

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"

Facoltà di architettura

/

Dipartimento di Attuazione e Configurazione dell'Architettura

Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura *ciclo XVII*

Materiali costruttivi a basso impatto ambientale:

La Terra Cruda

Dottoranda: arch. Maria Luisa Miccoli

Relatore: Prof. arch. Dora Francese

Coordinatore: Prof. Virginia Gangemi

Indice

Introduzione

Parte I

1. La composizione delle terre
2. Le analisi preliminari per il riconoscimento delle terre
3. Abbandono e riscoperta delle architetture in terra
4. La ripresa dell'interesse in occidente per le costruzioni in terra
5. Gli intonaci in terra
6. La terra come materiale da costruzione a basso impatto ambientale
7. La terra cruda nel quadro normativo italiano
8. Le nuove sperimentazioni costruttive con la terra cruda
 - Le nuove costruzioni nel New Mexico
 - Le "tire house"
 - Le sperimentazioni di Nader Kalili: il super - adobe e le ceramic house

introduzione

1. Le costruzioni in terra in zona sismica negli Stati Uniti
2. I limiti di una diffusa prassi costruttiva per il consolidamento delle strutture in terra in zona sismica
3. I nuovi indirizzi per una progettazione antisismica appropriata
4. Il Getty Seismic Adobe Project
5. Il caso della città di Ban
6. Il punto sulla situazione in Italia: le modifiche proposte alla legge del 2 febbraio 1974, n. 64 sui provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni in zona sismica

CONCLUSIONI

Bibliografia

Introduzione

La terra cruda è senza dubbio il più antico e il più diffuso materiale da costruzione, eppure molti tra coloro con i quali ho avuto modo di parlare del tema della mia tesi di dottorato, inclusi molti architetti, non ne avevano mai sentito parlare. Alcuni sembravano sorpresi ma allo stesso tempo affascinati: poter costruire con la stessa terra rimossa per la realizzazione delle fondazioni, di un volume seminterrato... cosa potrebbe identificarsi meglio con l'idea di costruzioni sostenibili e a basso costo?

Avere in casa intonaci in terra atossici, isolanti termicamente e acusticamente: una soluzione ideale.

Usarli è un altro discorso: è necessario superare le prime diffidenze delle imprese, ed ordinare per tempo il materiale, in quanto gli intonaci in terra non fanno parte solitamente dei prodotti che i rivenditori hanno pronti in magazzino, piccole difficoltà che possono bastare ad ostacolarne l'uso. Ho conosciuto diverse persone il cui sogno era di costruirsi una casa completamente scavata nella terra. Da architetto un'idea simile mi ha sempre lasciata perplessa. E' vero che dal terreno bisogna isolarsi, ma evidentemente vivere "nella terra" ha un fascino legato all'idea ancestrale del rifugio. Molti altri interlocutori avevano invece un atteggiamento assai diverso (soprattutto tecnici in qualche modo legati al mondo delle costruzioni), restavano interdetti all'idea che

ci si potesse ancora rivolgere a tipologie costruttive così arcaiche e povere; impossibile, inutile ed anacronistico interessarsi ancora ad un tema simile. Posizioni prese ovviamente senza la minima documentazione sull'argomento.

Prima di assistere ad un seminario tenuto nel 2003 dall'architetto Carola¹, durante corso di progettazione ambientale della prof. Francese, non avevo idea di quali fossero le possibilità costruttive di questo materiale. La terra era sempre stata per me un materiale incoerente anche se chi ha provato con una zappa a dissodare il terreno di un giardino, sa quanto la terra possa risultare compatta...

La prima volta che ho sperimentato in modo diretto la terra come materiale da costruzione, è stato in occasione del seminario tenuto dalla prof. M.C. Forlani², sempre durante il corso di progettazione ambientale del 2003 della prof. Francese. La prof. Forlani portò con sé un mattone in terra (adobe) realizzato dai suoi studenti in occasione di un workshop. Fui sorpresa dalla sua compattezza, mi ricordava molto il tufo o l'arenaria. Ma quello che mi colpì di più durante il seminario fu la bellezza dei setti in pisè realizzati da Martin Rauch. La sua non era affatto architettura "vernacolare" ma un'architettura assolutamente moderna, di alta qualità formale e con un ottimo confort abitativo, come ebbi io stessa occasione di verificare nel corso dell'anno successivo in occasione di un viaggio di studio in Austria dove risiede e lavora Martin Rauch.

Fu in quell'occasione che decisi di occuparmi delle costruzioni in terra, e più precisamente dei motivi che

1

² Prof. M.C. Forlani docente di tecnologia dell'Architettura presso la Facoltà di Architettura di Pescara

hanno fino ad ora ostacolato la diffusione delle costruzioni in terra in Italia.

Quando ho iniziato questa ricerca non mi era chiaro se stessi trattando del recupero di un'antica tradizione costruttiva o di qualcosa di nuovo (era nuovo per me, appena laureata in architettura, e lo era per molti miei colleghi) almeno nell'uso che ne facevano architetti come Martin Rauch. Oggi, al termine della mia ricerca, ritengo che piuttosto che parlare della "riscoperta" di un materiale del passato, si debba piuttosto riconoscere che si sta soltanto concludendo quel periodo di frattura iniziato nel dopoguerra, durante il quale si è ritenuto di dover abbandonare antichi materiali ed antichi sistemi costruttivi. La ricostruzione postbellica ha guardato esclusivamente alle nuove tecnologie. ai nuovi sistemi costruttivi più veloci dei tradizionali fondati sull'uso dell'acciaio e del calcestruzzo armato che consentivano una maggiore libertà formale grazie quale è stato possibile costruire una nuova immagine di modernità, che rispecchiava il desiderio di chiudere con il passato e di aprire una nuova epoca di rinascita. Con la nuove tecnologie si sono realizzate architetture "leggere", magnifiche, con ottime prestazioni antisismiche. I nuovi materiali leggeri hanno reso il lavoro degli addetti alle costruzioni molto meno duro; maneggiare mattoni forati o blocchi di cemento alleggerito è molto più facile e veloce che non maneggiare pesanti mattoni in tufo; lavorare i nuovi intonaci premiscelati, risparmia molto lavoro. e consente di realizzare intonaci di spessore minimo, con tempi rapidi di essiccazione.

Agli inizi degli anni '70, si è avviato un periodo di revisione dei criteri e della scelte dei sistemi costruttivi. La spinta al cambiamento è stata determinata dall'aumento del costo del petrolio e dalla conseguente crisi energetica. Allora si evidenziarono i limiti di un sistema estremamente

energivoro e dipendente da risorse non rinnovabili, con un ritmo di produzione di materiali di dismissione incompatibile con i tempi di smaltimento degli stessi.

La nuova consapevolezza dei problemi ambientali, ha portato al nascere di ricerche volte ad esplorare nuovi ambiti per lo sviluppo di tecnologie appropriate in grado di aprire nuove strade ad uno sviluppo più sostenibile.

In Francia nel 1981 presso il centro Pompidou (Beaubourg, Parigi) fu proposta la mostra "Passato, presente e futuro dell'architettura in terra cruda" che raccoglieva studi, ricerche ed esperienze maturati negli anni. La risonanza di tale evento ha avuto come esito la diffusione delle ricerche sulle costruzioni in crudo in tutta Europa, particolarmente in Francia, ed il potenziamento e la notorietà a livello internazionale del "Craterre"; un centro di ricerche sulle specifiche problematiche inerenti l'uso del materiale e dei sistemi costruttivi in terra per nuove costruzioni ed interventi di conservazione del patrimonio esistente. Negli stessi anni, e per gli stessi promotori, si concretizzava anche l'iniziativa finalizzata all'edificazione di un intero quartiere in crudo - l'Isle d'Abeau - come dimostrazione della praticabilità della reintroduzione del crudo con tecnologie innovative nella produzione edilizia contemporanea.

Iniziarono sperimentazioni costruttive in tutt'Europa, soprattutto in Germania ed in Austria, dove G.Minke e Martin Rauch portarono avanti una importante campagna di studi, che ebbe come esito una grossa innovazione delle tecniche costruttive, e la diffusione delle costruzioni in terra non solo in Germania ed in Austria, ma in quasi tutt'Europa.

L'Italia resta fuori da questa ricerca.

Molti imputano il fenomeno allo scarso interesse da parte delle industrie al finanziamento della ricerca tecnica sulla

terra. Le industrie non avrebbero un ritorno economico dalla diffusione di queste tecnologie, data la semplicità di reperire il materiale da costruzione ad un costo praticamente nullo, al di fuori di ogni canale commerciale. Addirittura le industrie produttrici di cemento avrebbero interesse a contrastare la diffusione di questa tecnologia. Ma la diffusione delle costruzioni nel New Mexico, nel cuore del capitalismo americano, dovrebbe testimoniare esattamente il contrario. La diffusione delle tecniche costruttive legate alla terra cruda è avvenuta sulla base dell'iniziativa privata di alcune imprese di costruzione, che hanno avuto un ottimo tornaconto economico, data la diffusione del fenomeno. Inoltre ritengo sia un'eccessiva semplificazione ritenere le costruzioni in terra costruzioni a basso costo, al di fuori dei circuiti economici.

Le costruzioni in terra possono essere anche questo, come testimoniano le realizzazioni di costruzioni a basso costo e di ottima qualità formale e di confort, realizzate nei paesi sottosviluppati, usando quasi esclusivamente manodopera non specializzata locale e di gruppi internazionali di volontari. Ma costruzioni come quelle di Rauch in Austria o quelle di Rick Joy in New Mexico e tante altre, testimoniano come con la terra si possano realizzare costruzioni di altissimo livello tecnologico; si possano integrare diverse tecnologie per ottenere costruzioni con un migliore comportamento bioclimatico, e con nuove possibilità compositive, che un materiale plastico e che si presta a lavorazioni così diverse come la terra è in grado di offrire.

Un altro problema in Italia alla diffusione della terra cruda è la rigidità della normativa antisismica in Italia.

Ma la realizzazione di costruzioni in California

Capitolo 1

Composizione delle terre

Le terre sono il prodotto di disgregazione delle rocce e della decomposizione di sostanze organiche, in quanto tali, hanno una composizione chimica estremamente variabile. Lo strato più superficiale del terreno, fino ad una profondità di 30 cm, è il così detto strato "arabile", ricco di sostanze organiche indispensabili alla vita, ma assai dannose se si intende far uso del terreno come materiale da costruzione. Questo strato di terra, prezioso ad esempio per la costituzione di giardini, non si utilizza quasi mai come materiale da costruzione, che tradizionalmente viene estratto al di sotto dei 30 cm dello strato arabile. Nonostante nella più diffusa tradizione costruttiva sia sufficiente scendere al di sotto dei 30 cm per prelevare materiale idoneo per le costruzioni, è consigliabile attingere da strati di terreno più profondi, al di sotto dei primi 70 cm. La terra infatti, generalmente caratterizzata da una certa basicità, ha negli strati più superficiali solitamente un ph piuttosto basso, probabilmente a causa all'aumento del grado di acidità delle piogge; tale acidità rende la terra attaccabile dai funghi, che si sviluppano in ambienti con un ph compreso tra 4,5 e 6,5. E' quindi importante verificare che la terra da usare per le costruzioni, abbia un ph superiore.

Le sostanze che compongono i terreni si possono distinguere per dimensione. Possiamo così identificare cinque classi:

- le pietre, di dimensioni superiori ai 60mm
- la ghiaia, di dimensioni comprese tra i 2mm e i 60 mm
- la sabbia, di dimensioni comprese tra i 0.06mm e i 2 mm
- il limo, di dimensioni comprese tra i 0.002mm e 0.06 mm
- e le argille, di dimensioni inferiori ai 0.02mm

Le pietre, la ghiaia, la sabbia ed il limo, sono caratterizzate da una forte permeabilità, da una minima o nulla capacità di assorbire acqua, e da una bassissima o nulla capacità di coesione; solo il limo infatti per le sua ridotta dimensione granulometrica presenta una minima capacità coesiva, dovuta alla sua frizione interna. Le proprietà coesive dei terreni sono legate alla loro percentuale di argilla.

Le argille sono rocce clastiche, ovvero un prodotto secondario derivato dalla degradazione di altre rocce preesistenti o dai depositi di loro detriti, possono rimanere sciolte o cementarsi a loro volta e raccogliersi in depositi, come le ardesie. Sono sostanze colloidali ed in quanto colloidali hanno la capacità di trattenere acqua rigonfiandosi. (..)

Esistono molti tipi di argille, le più pure sono di colore bianco, ma più spesso, si legano ad altre sostanze come il quarzo, i feldspati, mica, o agli ossidi di ferro (come le ocre), ecc., ed essendo impure, assumono caratteristiche diverse, spesso cedute dalle sostanze a cui si legano e possono ad esempio assumere diverse colorazioni: grigie, azzurre o nere, gialle, rosse, brune o verdastre.

Esistono varie famiglie di argille, che a loro volta si riuniscono in una decina di specie, di queste, tre sono le più presenti nelle terre; la caolinite, l'illite e la montmorillonite. Le illiti hanno le caratteristiche più adatte per essere utilizzate nelle costruzioni, infatti non presentano la rigidità delle caoliniti, né l'eccessiva capacità di assorbire acqua (e quindi di gonfiarsi) delle montmorilloniti.

Tutte le argille presentano un alto grado di plasticità, se impastate con acqua possono essere trasformate in una massa modellabile, che seccandosi indurisce subendo una considerevole riduzione di volume, ed in quanto colloidale reversibile, può riassumere la plasticità se nuovamente bagnata e modellata; la creta, un composto di argilla e polvere calcarea, ne è un esempio.

Il contenuto di argilla conferisce alle terre le medesime caratteristiche, più evidenti quanto maggiore è la componente argillosa del terreno. Le terre con un più alto contenuto argilloso sono dette **grasse**, mentre le terre con un maggiore detrito sabbioso sono dette **magre**.

Capitolo 2

Le analisi preliminari per il riconoscimento delle terre

L'identificazione corretta di una terra è una tappa indispensabile per stabilire le caratteristiche e la scelta della tecnologia di trasformazione in materiale da costruzione.

Esiste una grande varietà di prove che si possono effettuare sulla terra, tra queste sono state selezionate alcune prove semplificate che consentono un'indagine sufficientemente approfondita sulle caratteristiche del materiale disponibile.

Queste prove, dette anche esami sul campo, a differenza delle prove di laboratorio, non necessitano di particolari strumenti o attrezzature sofisticate, ma si eseguono facilmente in cantiere, per questa ragione si definiscono *“analisi sul campo”*.

Analisi preliminari o analisi sul campo

In primo luogo occorre sapere se il terreno da analizzare è di tipo sabbioso, limoso o argilloso, o se è presente del materiale organico che ne impedisce l'utilizzo nelle costruzioni.

Se il terreno ha un aspetto molto eterogeneo, sarà necessario effettuare il prelievo del campione da analizzare in diversi punti, il prelievo, circa 1,5 kg di terreno, dovrà avvenire al di sotto dei 30 cm dello strato

arabile, strato troppo ricco di sostanze organiche, per le prove di compattamento sarà invece necessario prelevare dai 6 ai 10 kg di materiale. E' consigliabile effettuare una prima setacciatura in situ, per eliminare le pietre più grosse, così da ridurre il materiale prelevato e di conseguenza il peso del materiale da trasportare.

Analisi dei 5 sensi

Esame visivo

E' il primo approccio con la terra a secco; questo test consente una prima analisi granulometrica che ci dà un'idea delle proporzioni delle particelle piccole e, per deduzione, delle particelle più fini; le particelle più fini, visibili ad occhio nudo, sono quelle di 0,08 mm, quindi i granelli di argilla e limo sono invisibili. Per facilitare le valutazioni è consigliabile eliminare i sassi e le ghiaie prima di procedere.

Esame dell'odore

Serve a capire se ci troviamo di fronte ad un terreno organico che emana un inconfondibile odore di muffa, soprattutto se viene inumidito o riscaldato. La terra organica non è adatta alla costruzione.

Esame del morso

Prima di eseguire questo test bisogna assicurarsi che la terra non contenga materiali inquinanti e dannosi per la salute, ad esempio materiali organici.

Si tratta di una rapida valutazione per determinare se la terra in esame è sabbiosa, limosa o argillosa, si esegue schiacciando tra i denti un po' di terra: in caso vi sia una predominanza sabbiosa, scricchiolerà in modo fastidioso, invece, in presenza di un terreno limoso lo "scricchiolio" non provocherà quella sensazione fastidiosa e nel caso di terre argillose le particelle tra i denti non stridono affatto, anzi danno una sensazione liscia e farinosa. Una terra

secca, contenente molta argilla, risulta molto appiccicosa; se vi si appoggia la lingua si staccherà con difficoltà.

Esame tattile

Questo esame consente di determinare sul posto e con una certa esattezza le componenti base del terreno. Triturata la terra dopo averla privata delle parti più grosse e tastata tra le dita e il palmo: se la terra è sabbiosa si avrà una sensazione di rugosità e non si osserverà nessuna coesione; se la terra è limosa si avrà una debole rugosità e una volta inumidita diventerà mediamente plastica; se la terra è argillosa, presenta, a secco, dei grumi difficili da sbriciolare e quando se inumidita diventa plastica e collosa.

Esame del lavaggio delle mani

Questo esame è legato alla capacità della terra di reagire con l'acqua e restare attaccata alla mano evidenziando la percentuale della componente colloidale.

E' necessario spalmarsi tra le mani della terra leggermente bagnata e aggiungere abbondante acqua, fino a dilavarla quasi completamente: se la terra è sabbiosa le mani si sciacquano facilmente, se la terra è limosa risulterà farinosa e non troppo difficile da sciacquare, se invece la terra è argillosa da' una sensazione saponosa e le mani sono difficili da lavare completamente

Esami preliminari di qualità

Esame di penetrazione e aderenza

Questo esame consiste nel modellare con le mani della terra umida a formare una pallina. A questo punto con una lama o una spatola osserviamo la facilità di penetrazione nella terra e il residuo che aderisce alla superficie della lama quando questa viene estratta: se la lama si infila

difficilmente e la terra vi aderisce quando viene sfilata si tratta di una terra molto argillosa, se invece la lama penetra facilmente, la terra è poco argillosa.

Esame di lucentezza o del coltello

Si prosegue tagliando la pallina di terra in due parti e osservando la superficie del taglio: se la superficie del taglio si presenta opaca e leggermente sfarinata ci troviamo di fronte ad una terra limosa, se invece la superficie ha una certa lucentezza e plasticità ci troviamo di fronte ad una terra argillosa.

Prova di coesione

Si impasta nuovamente una pallina con la terra, con il pollice si forma una piccola fossetta che verrà riempita d'acqua; si osserva quindi in quanto tempo l'acqua viene assorbita completamente: se la terra è ghiaiosa l'acqua penetra molto velocemente; se la terra è sabbiosa l'acqua passa velocemente; se la terra è limosa l'acqua penetrerà lentamente; ed infine se la terra è argillosa l'acqua penetrerà molto lentamente.

Prova di sedimentazione semplificata

I precedenti esami permettono di avere un'idea della texture, delle quantità delle diverse componenti e della qualità delle parti fini.

Si può ancora realizzare una prova di sedimentazione semplificata che dirà con una maggiore precisione le quantità delle diverse componenti.

Si effettua riempiendo di terra per un quarto un flacone di vetro da un litro con il fondo piatto, si riempie quindi il rimanente volume con dell' acqua; si lascia riposare il composto per permettere l'impregnazione e la successiva triturazione manuale. Si agita vigorosamente il flacone e si lascia decantare per 1 ora quindi si agita nuovamente,

circa 45 minuti dopo osserveremo che la sabbia e la ghiaia si sono depositate sul fondo, al di sopra troveremo lo strato di limo e per ultimo lo strato di argilla.

Restano eventualmente in sospensione nell'acqua i colloidali estremamente fini.

Dopo 8 ore si può iniziare a misurare il prodotto definitivo della sedimentazione dei diversi strati di particelle, in basso si depositano quelle grosse, in alto le fini, si può così ottenere con una certa approssimazione la percentuale delle diverse componenti granulari tenendo presente che il limo e le argille hanno aumentato il loro volume a causa dell'imbibizione dell'acqua e del conseguente effetto di rigonfiamento.

Esame del ritiro lineare o test d'Alcock

Per questo esame si utilizza un contenitore di legno lungo 60 cm, largo 4 cm e profondo 4 cm. Si ingrassano le pareti del contenitore e si riempie accuratamente di terra comprimendola bene, la si lascia seccare al sole per 3 giorni o all'ombra per 7 giorni. Dopo questo intervallo si spingere la terra, che si presenterà asciutta e compatta, verso una delle estremità; questo test ci darà in centimetri la misura del ritiro del nostro campione di terra.

Esame del "sigaro"

Prepariamo un sigaro con della terra plastica e tenendolo in mano o su un ripiano spingiamo nel vuoto una delle estremità fino a quando il sigaro non si piega. Se questo avviene dopo i primi 4 cm la terra è di tipo sabbioso, se invece si piega a 15 cm vuol dire che la terra è argillosa; quando si rompe tra i 5 e i 15 cm la terra è buona per la produzione di mattoni compressi.

Abbandono e riscoperta delle architetture in terra

La terra è in uso da migliaia di anni come materiale da costruzione. E' un materiale estremamente versatile: estratto al di sotto dello strato arabile, setacciato e lavorato con acqua, diviene estremamente plastico, facile da lavorare. Si presta ad essere lavorato con molte tecniche diverse e ad essere miscelato con diversi additivi che possono migliorarne le prestazioni rendendo l'impasto più adatto al tipo di lavorazione che si intende eseguire. Asciugandosi solidifica, subendo un certo ritiro che dipende dalla quantità e dalla qualità di argilla contenuta nella terra, ed assume un aspetto ed una consistenza simile a quella di molte rocce tenere come il tufo o l'arenaria.

Il suo uso si è diffuso in tutti i continenti, adattandosi ai climi più diversi, alle diverse risorse del luogo, alle economie locali. Una incredibile varietà di tradizioni costruttive legate all'uso della terra si è diffusa in tutto il mondo, costituendo un incredibile patrimonio culturale.

Salvo rari casi, la terra per costruire è reperibile ovunque. Tutti i tipi di terra, quale che sia la sua composizione sono stati usati per costruire, con l'aggiunta di ogni possibile additivo per migliorarne le prestazioni: paglia, sterco animale, umore di piante succulenti, pula di riso, peli di capra o di altri animali, sangue e in fine cemento, legno, asfalto, calce e tanto altro. Ma per quanto sia possibile modificare la qualità del materiale con l'aggiunta di additivi, le caratteristiche dell'impasto dipendono per la maggior parte dalla qualità

della terra impiegata. La terra che dà le migliori prestazioni se impiegata per costruire è una terra piuttosto argillosa, che solitamente si raccoglie lungo il percorso dei corsi d'acqua; una terra "sporca" e limosa non avrà mai buone caratteristiche costruttive, necessarie per garantire durabilità ai manufatti.

Quando si parla di costruzioni in terra si pensa sempre a costruzioni fragili, povere, in qualche modo provvisorie, realizzate in terra per mancanza di risorse più nobili e durature.

In effetti, la mancanza di materiali più duraturi quali il legno, la pietra è stata all'origine dello sviluppo delle costruzioni in terra; ma quando l'uso della terra non è stato un ripiego, ma ha dato origine ad una solida tradizione costruttiva, mettendo a punto tecniche specifiche, spesso sofisticate, in grado di sfruttare le qualità del materiale per migliorare la statica delle costruzioni, il loro confort interno, e le possibilità espressive, sono nate architetture di grande pregio, che non hanno nulla da invidiare alle grandi architetture realizzate con altri materiali più "duraturi". Ne sono magnifici esempi la porta urbana di Tel Dan, le fortezze egizie di Urinati e di Wadi Halfa, la cittadella di Ghazni in Afghanistan, la fortezza incaica di Paramonga in Perù, i complessi monastici Copti del basso Egitto, le Moschee di Mali, le sinagoghe persiane, le missioni gesuitiche in Argentina, Messico, ed in California, le case torri dello Yemen, le grandi cinte murarie di Samarcanda, di Marrakech, di Ur, la Muraglia Cinese, le grandi dighe in terra, **i monasteri tibetani**, le antiche strutture a scala degli osservatori astronomici dell'India musulmana.

Queste citazioni per illustrare la qualità architettonica di opere che hanno resistito al passare dei millenni, e che presuppongono una notevole evoluzione tecnica dei sistemi costruttivi.

Uzbekistan : le città della via della seta



Khiva: veduta del kukhna ark XII sec



Giovanni Camici Campiglia M.ma (LI) 339/6434516

Khiva: porta del kukhna ark XII sec



Giovanni Camici Campiglia M.ma (LI) 339/6434516

Khiva: le mura



Samarcanda: piazza registan XIV-XV sec.



Samarcanda: piazza registan XIV-XV sec



Samarcanda: mausoleo di tamerlano XV sec



Bukhara: mura della fortezza X sec.



Bukhara: bazar taqi zargaron X - XII sec.

Le mura ciclopiche di khiva VII sec





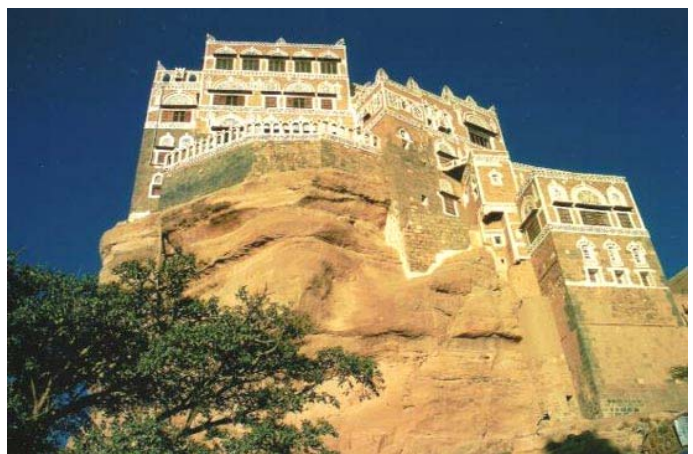
Yemen



Marib: la città vecchia



Sana'a: case a torre



Il palazzo Dhar al-hajar



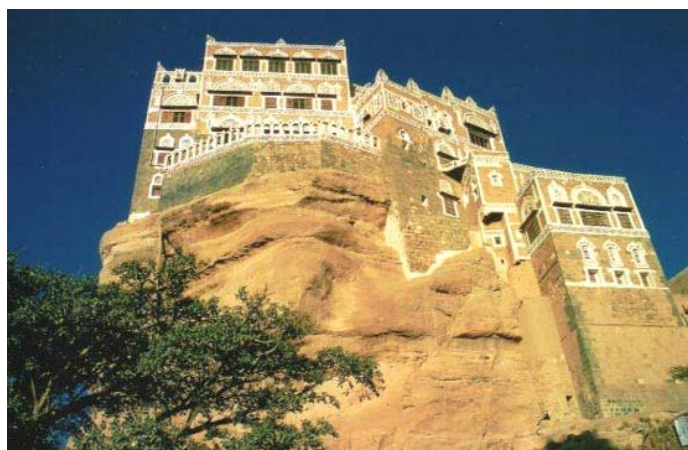
Sana'a: case a torre



Sana'a: la città vecchia



Il palazzo Dhar al-hajar



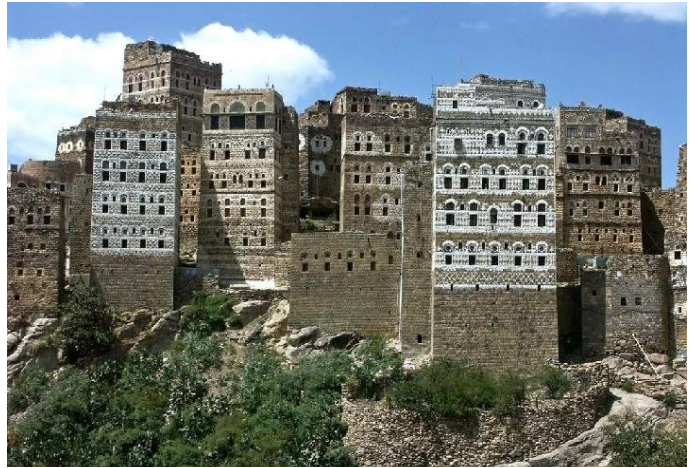
Il palazzo Dhar al-hajar

Shibam la manhattan del deserto

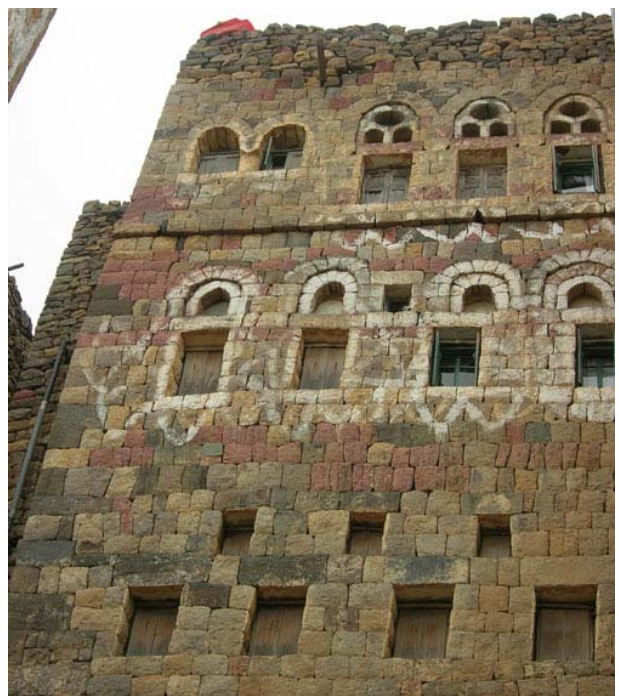


Shibam: i grattacieli di fango

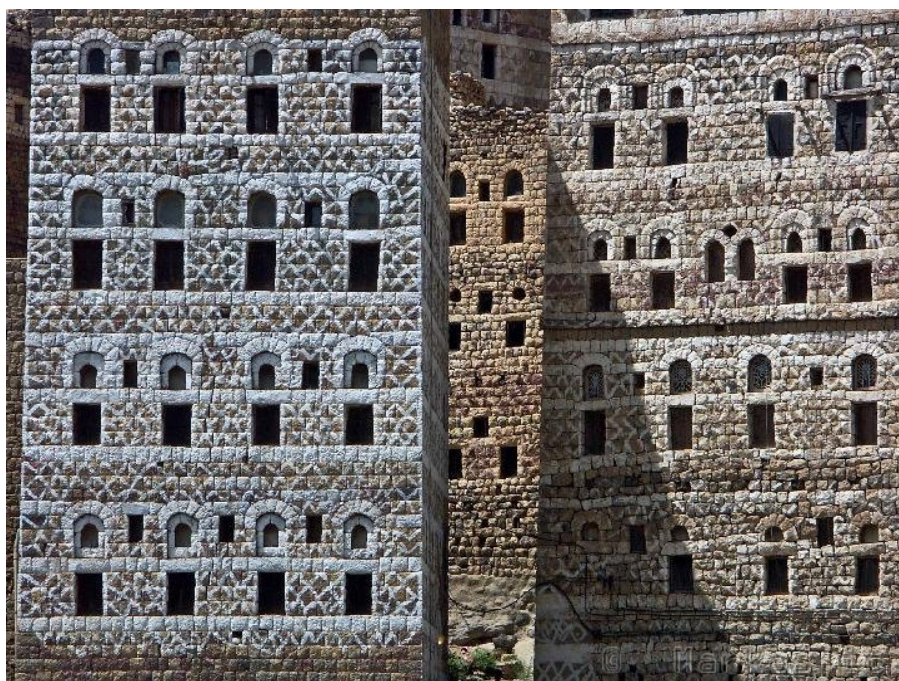




Al hajjara: i palazzi della città



Al hajjara “armonie di fango e gesso”



Se è vero che la terra è un materiale più vulnerabile di altri, la durevolezza di molte architetture in terra del passato, ancora conservate in ottimo stato, testimonia il successo di una tradizione costruttiva evolutasi in migliaia di anni. Si tratta di tradizioni non scritte, tenute in vita dalla memoria di un sapere pratico, tramandato di generazione in generazione. Una cultura tanto preziosa quanto fragile, in quanto è sufficiente che la pratica costruttiva, tramandata sui cantieri dai maestri agli apprendisti, si interrompa per poche decine di anni, che molte delle conoscenze conquistate in secoli di esperienza e sperimentazione vengano perse. Questo è quanto è accaduto in occidente, quando nel dopoguerra, la ricostruzione postbellica ha guardato ai nuovi sistemi costruttivi, più veloci dei tradizionali, fondati sull'uso del calcestruzzo armato che consentiva una maggiore libertà formale sulla quale è stato possibile costruire una nuova immagine di modernità, che rispecchiava il desiderio di chiudere con il passato e di aprire una nuova epoca di rinascita. Il “boom” economico, il nuovo stile di vita caratterizzato da ben altri livelli di confort rispetto al passato, si è identificato con la nuova immagine del moderno. I nuovi modelli sono però entrati in crisi negli anni '70, quando l'aumento del costo del petrolio ha determinato i continui aumenti dei costi energetici rivelando l'insostenibilità di un sistema dipendente da risorse non rinnovabili, e con un ritmo di produzione di materiali di decomposizione incompatibile con i tempi di smaltimento. Si evidenzia così la necessità di un controllo della qualità ambientale globale, e nascono in tutti i paesi sviluppati ricerche volte ad esplorare gli ambiti di una “tecnologia appropriata” che sia in grado di guidare lo sviluppo verso soluzioni che abbiano un impatto ambientale sostenibile. In questo contesto si inquadra il ritrovato interesse nei paesi “ipersviluppati” per le costruzioni in terra che rappresentano

un tipo di costruzione meno “energivora”, rispetto ai moderni modelli “dissipativi”.

Se nei paesi occidentali, dove non esiste più ormai una tradizione costruttiva legata alla terra cruda, si tenta di riscoprire i vecchi sistemi costruttivi innovandoli, nei paesi dove questa tradizione è ancora viva e legata ad una cultura antica, al clima, alle economie locali, si cerca di abbandonarla per seguire quei modelli sui quali è stata costruita l'immagine di una modernità ricca ed evoluta, l'immagine di quei modelli che stanno entrando in crisi nel mondo occidentale. E questo ad esempio il caso dei paesi del nord del Mediterraneo, dove i governi centrali, cercano da decenni, nonostante l'opposizione dei professionisti locali, di abbandonare le costruzioni in crudo in favore delle “nuove costruzioni” in acciaio e in cemento armato, che portano l'immagine di una avanzata tecnologia.

Un grosso aiuto a questa politica di “rinnovamento di immagine” è stato dato dai danni ingenti prodotti dai recenti terremoti di portata catastrofica, che hanno tormentato queste regioni (come del resto tutte le aree a rischio sismico del pianeta) in questi ultimi decenni.

In Iran ad esempio il governo ha vietato già da diversi anni la costruzione di edifici in terra, in quanto ritenuti troppo vulnerabili alle sollecitazioni sismiche. Sugli edifici in terra sono oggi possibili solo interventi di manutenzione. Sono stati avviati programmi di ricostruzione che prevedono la realizzazione di nuovi insediamenti in cemento armato concepiti secondo criteri antisismici.

Le costruzioni in cemento armato però risultano estremamente più costose delle case in terra in paesi come l'Iran, dove tanto il cemento quanto l'acciaio sono materiali di importazione. Le nuove costruzioni inoltre hanno i requisiti necessari a garantire un accettabile confort interno,

Un grosso aiuto a questa politica di “rinnovamento di immagine” è stato dato dai danni ingenti prodotti dai recenti terremoti di portata catastrofica, che hanno tormentato queste regioni (come del resto tutte le aree a rischio sismico del pianeta) in questi ultimi decenni.

In Iran ad esempio il governo ha vietato già da diversi anni la costruzione di edifici in terra, in quanto ritenuti troppo vulnerabili alle sollecitazioni sismiche. Sugli edifici in terra sono oggi possibili solo interventi di manutenzione. Sono stati avviati programmi di ricostruzione che prevedono la realizzazione di nuovi insediamenti in cemento armato concepiti secondo criteri antisismici.

Le costruzioni in cemento armato però risultano estremamente più costose delle case in terra, in paesi come l'Iran, dove tanto il cemento quanto l'acciaio sono materiali di importazione.

Le costruzioni in terra cruda hanno ottime capacità termigrometriche: hanno cioè una grossa inerzia termica, in grado di ritardare l'effetto delle escursioni termiche dell'ambiente esterno sull'ambiente interno, conservando la frescura delle ore notturne nelle ore più calde del giorno, mentre parte del calore diurno, accumulato dalle pareti durante il giorno, viene rilasciato durante la notte, il che determina una stabilizzazione del clima interno su temperature meno estreme di quelle esterne; inoltre l'argilla contenuta nella terra delle murature, non avendo subito processi di cottura, mantiene le sue caratteristiche di colloide reversibile, ed in presenza di forte umidità, si gonfia, assorbendone una parte, rilasciandola poi nell'ambiente quando il tasso di umidità scende, agendo da stabilizzatore del livello di umidità interno alle abitazioni.

L'inerzia termica, unita al controllo igrometrico, non che alla capacità di un ottimo isolamento acustico garantisce buoni livelli di confort interno. Nei paesi poveri, o meglio dove è

povera la maggior parte della popolazione che non ha quindi la possibilità di sostenere i costi di impianti di riscaldamento o di raffreddamento, questi sistemi passivi per il controllo climatico interno, sono estremamente importanti.

Un altro problema relativo all'imposizione di un radicale cambiamento dei sistemi costruttivi, è legato al fatto che l'Iran, come la maggior parte dei paesi del sud del Mediterraneo è caratterizzato da piccoli centri, dove l'autocostruzione è un fenomeno molto diffuso; imporre una trasformazione dei sistemi costruttivi tradizionali necessiterebbe di una capillare organizzazione di corsi di formazione per la mano d'opera locale, ma sarebbe comunque difficile aspettarsi in tempi brevi una corretta esecuzione delle nuove tecniche, che oltretutto mal si prestano a tentativi di autocostruzione.

Ed infatti dalle descrizioni dei danni riportati dai villaggi più colpiti dell'Iran in seguito agli ultimi terremoti,* si rileva che non sono state soltanto le costruzioni in terra ad aver subito cedimenti, ma anche le più moderne costruzioni in acciaio ed in cemento armato. Dai resti degli edifici si rilevano evidenti gravi errori costruttivi, che hanno concorso al crollo rovinoso delle costruzioni, come la mancanza di collegamento tra gli elementi in acciaio delle strutture, ed l' impasto del calcestruzzo male eseguito, con la conseguente formazione di disomogeneità interna... Un altro disastroso effetto dei nuovi indirizzi del governo iraniano per la sostituzione delle costruzioni in terra con nuove costruzioni antisismiche in c.a., è la diffusione di improbabili strutture miste in cemento armato e tarra, incredibilmente pericolose da un punto di vista statico. Così come testimonia l'architetto Nader Khalili*.... capita di vedere realizzate sui sottili muri con struttura in

calcestruzzo armato pesanti cupole in terra, per migliorare il confort interno. Un solaio piano infatti è esposto al sole in modo costante per tutto il giorno, mentre una cupola avrà sempre un lato in ombra che, creando zone di maggiore frescura, genera all'interno delle abitazioni movimenti d'aria; inoltre una cupola in terra ha una grossa massa termica, molto più efficiente di un tetto piano realizzato in calcestruzzo armato e tavelle, per difendere gli ambienti sottostanti da caldo. Certo una struttura così realizzata ha ben poche possibilità di resistere ad un evento sismico di pur-lieve entità.

Un altro esempio di improbabile ibrido strutturale tra terra ed calcestruzzo armato è costituito da murature in adobe, più economiche e semplici da realizzare, con solai in laterizi e cemento, realizzati senza travi di bordo o allettamento in mattoni per la ripartizione del carico delle travi sulle murature.

Queste strutture ibride, come le strutture in cemento armato ed in acciaio, non hanno certo avuto una resistenza al sisma migliore delle costruzioni tradizionali in terra...

La ripresa dell'interesse in occidente per le costruzioni in terra

Nei paesi occidentali è esistita un'importante tradizione costruttiva legata alle costruzioni in terra. I più antichi setti in pisé rinvenuti nella Gallia meridionale risalgono all'età del bronzo. L'uso della terra come materiale da costruzione era noto e praticato dai greci, come dai cartaginesi, che usavano soprattutto la tecnica del pisè, che si diffuse in molte regioni dell' Europa, fino al medioevo, quando al pisè venne preferita la tecnica del torchis, o Fachwerk, o wattle and daub, ovvero terra impastata con la paglia e poi applicata su una struttura in legno composta da un'intelaiatura che costituisce la struttura principale, ed una struttura secondaria tipicamente realizzata in rami sottili e flessibili di nocciolo o salice, sulla quale si applica poi l'impasto di terra e paglia. La diffusione nel medioevo di costruzioni in terra su struttura, piuttosto del pisè o altre tecniche più massive è d'altra parte coerente con lo sviluppo delle strutture gotiche, caratterizzate dalle strutture nervate delle volte a crociera piuttosto che dai setti murari tipici fino all'epoca romanica. Le fachwerkhaus si diffusero in tutta l'Europa del nord e dell'est. Nel tempo saranno sviluppate molte altre tecniche per accompagnare con materiali diversi dalla terra le strutture in legno delle fachwekhause; questo tipo di struttura è ancora molto diffusa e caratterizza ancora oggi moltissimi centri storici di molte città: austriache, olandesi, belga, dei paesi baltici, della repubblica Ceca ecc. (foto n_).

Per quanto riguarda le costruzioni in bauge o wellerbau, o cob, o massone, costruzioni in muratura realizzata da un impasto denso di terra e paglia, preparato e poi direttamente impilato e compattato pressando il materiale con i piedi, viene eseguito senza casseformi, modellato a mano ed è caratterizzato da una superficie piuttosto irregolare. Sono diffuse nel Devon inglese, nella regione di Waimar e di Lipsia

in Germania, nella Normandia e nella Bretagna francese. In Italia sono presenti nell'entroterra della costa adriatica, nelle Marche ed in Abruzzo. Le murature realizzate con la tecnica del massone sono molto solide, si tratta della stessa tecnica con cui nello Yemen sono stati realizzati i famosi "grattacieli del deserto", palazzine che arrivano a trenta metri di altezza (fig.N__), anche se in Europa sono state realizzate costruzioni moltopiù semplici (foto n.) tipicamente rurali.

Il pisé incontrò una rinascita nel secolo dei Lumi, quando ritornò in uso grazie alla sua incombustibilità. Riscoperto per opera di François Cointeraux, un architetto rurale di origine lionese (1740 - 1830), le cui tecniche per le costruzioni in terra sono state poi diffuse in Italia nel 1793 dal Rosso con il trattato "Della economica costruzione delle case di terra". Nel 1786, Cointeraux costruì la sua prima casa "incombustibile" in pisé. Seguirono molte altre costruzioni in pisé, che tutt'oggi rappresentano un tratto caratteristico di alcune regioni della Francia, come la regione del Delfinato.

La robusta massa muraria dei setti in pisé, ottima per ammortizzare il colpi dei proiettili, e la sua incombustibilità, rendeva la terra particolarmente indicata per la costruzione di caserme. Ed infatti nel 1808 Napoleone chiamò François Cointeraux per la costruzione di caserme con la tecnica del pisé. D'altro canto l'uso della terra nella tradizione militare è sempre molto presente, per la costruzione di bastioni, di trincee o per la costruzione di mura difensive.

Esaurite le necessità belliche, le caserme si trasformarono in centri abitati, tuttora esistenti:::

Nella manualistica del '700 e dell'800, le tecniche costruttive in terra vengono classificate come tecniche lente, in quanto la terra necessita di tempi piuttosto lunghi di essiccazione. Questa lentezza le rendeva poco adatte alle costruzioni in ambiente urbano, mentre al contrario, il loro basso costo e la semplicità di realizzazione, soprattutto nell'autocostruzione

le rendeva particolarmente indicate per le costruzioni in zone rurali. Questa caratterizzazione delle case in terra come case economiche, rurali, poco moderne, ha condizionato l'opinione generale, portando al nascere di un pregiudizio che è stato fatale in molte zone alla sopravvivenza delle stesse costruzioni in terra. Le case di fango, come spesso vengono definite in modo dispregiativo, sono state sinonimo di miseria. Con la diffusione nel dopoguerra

.

Capitolo X

Gli intonaci in terra

Gli intonaci in terra, ovvero gli intonaci a base di argilla¹, garantiscono prestazioni tali da poter essere considerati gli intonaci ideali nella bioedilizia. Sono costituiti infatti da materiale assolutamente ecologico, riciclabile, non tossico; inoltre le sue proprietà igroscopiche, ottima traspirabilità, permeabilità al vapore, la capacità di agire come regolatore dell'umidità relativa e della temperatura interna; le notevoli prestazioni di fonoassorbimento, di isolamento acustico, l'ottima protezione dai campi elettromagnetici generati da impianti ad alta tensione, lo rendono altamente bio-compatibile.

L'applicazione di intonaci a base di terra non comporta grosse difficoltà rispetto ad un normale intonaco a base di cemento. Se si reperisce la materia prima presso una ditta specializzata è possibile realizzare intonaci a frattazzo o con intonacatrice industriale attenendosi alle indicazioni del produttore.

Un altro discorso vale invece per la produzione di intonaci in cantiere, ovvero realizzati con terreno prelevato nei pressi dello stesso cantiere, ad esempio ricavato dagli scavi di fondazione. In questo caso diventa necessario disporre di personale specializzato per riconoscere la granulometria dell'impasto e stabilire il quantitativo d'acqua ottimale.

Gli intonaci in terra si prestano ad essere applicati su differenti supporti come murature in mattoni cotti, pietra, legno o cemento, oltre naturalmente a tutte le superfici in

¹ I contenuti di questo capitolo si rifanno all'esperienza maturata in occasione del seminario teorico pratico organizzato a Casalpusterlengo (Milano) da Riccardo Chiozzi dall'associazione "Genus Loci" nel maggio 2004; Seminario condotto dall'arch. Sergio Sabatini e dall'arch. Mina Bardiani

terra.

Gli intonaci a base di terra, i più diffusi fino a pochi decenni fa, non che i più poveri, sono tornati in uso grazie alle loro prestazioni, ideali per migliorare il livello di benessere in door. ...

Le prestazioni di un intonaco in terra

- **regolazione dell'umidità relativa dell'aria** all' interno degli ambienti trattati: l'argilla, contenuta nell'intonaco, ha la proprietà di assorbire l'umidità in eccesso nell'aria (senza per questo perdere consistenza) e di cederla quando l'ambiente circostante è più secco.

Infatti in una casa di terra l'umidità relativa dell'aria si mantiene nelle percentuali ottimali, con un intervallo $50\% \leq \%U \leq 70\%$

L'architetto tedesco Gernot Minke di Kassel ... ha dimostrato che la funzione di regolazione dell'umidità relativa dell'aria viene svolta nei primi 2 cm di spessore nei manufatti di terra cruda, lasciando quindi il ruolo di regolatore interamente allo strato di intonaco in terra.....

- **regolazione della temperatura:** la proprietà della terra cruda di trattenere l'umidità in eccesso cedendola quando l'ambiente è secco contribuisce a mantenere costante la temperatura interna, migliorando il benessere dell'ambiente abitativo e la sua salubrità.....

- **fonoassorbenza:** la terra gode di ottime proprietà fonoassorbenti, per es. è tra i pochissimi materiali che

assorbono i toni bassi; un ambiente intonacato in terra cruda attutisce tutti i rumori forti, sia che -provengano dall'esterno che dall'interno.

- **protezione dai campi elettromagnetici:** di recente, il professor Schneider dell'istituto militare di Monaco di Baviera ha dimostrato, attraverso una serie di ricerche, la capacità della terra di proteggere dai campi elettromagnetici sviluppati da impianti ad alta tensione: 2,5 cm di intonaco eliminano il 75% delle radiazioni, un blocco di terra cruda di 11 cm di spessore elimina il 98% delle radiazioni....

- **Inalterabilità cromatica nel tempo:** il colore degli intonaci a base di terra non si altera nel tempo perché l'argilla, che trattiene i pigmenti colorati, è insensibile ai raggi ultravioletti.

- **Riduzione delle sostanze inquinanti nell'aria:** l'argilla ha la capacità di trattenere vari inquinanti che sono presenti nell'aria, come gas e polveri disciolte nel vapor acqueo.

Intonaci prodotti con terre locali

È possibile produrre malte per intonaci utilizzando terre locali preventivamente selezionate e/o miscelate con altre terre o sabbia sino ad ottenere la granulometria ottimale. Fino a pochi decenni fa rientrava nelle lavorazioni ordinarie di un cantiere, mentre oggi è necessario riacquisire le competenze necessarie attraverso opportuni corsi di specializzazione.

La realizzazione di intonaci utilizzando materiale reperito in loco, magari dagli scavi di fondazione, consente di realizzare intonaci di altissima qualità a bassissimo costo.

La prima fase di tale lavorazione consiste nel prelevare la terra dagli scavi, separandola dallo strato arabile e dal

pietrame di grosse dimensioni; la terra viene quindi stoccata per alcuni mesi (meglio durante il periodo invernale) in modo che cominci il processo di disgregazione.

La preparazione della terra per la realizzazione delle malte deve essere eseguita con terreno asciutto e con l'ausilio di polverizzatori, manuali o meccanici che spesso eseguono anche la setacciatura; in ogni caso tutte le componenti di diametro superiore ai 2 mm devono essere scartate.

La fase più importante della lavorazione consiste nell'individuare la giusta proporzione tra sabbia e argilla. La sabbia, il ghiaietto ed il limo costituiranno la struttura portante dell'intonaco mentre l'argilla costituirà il loro legante. La sabbia deve avere una granulometria mista, appunto dai 2 mm di dimensione del ghiaietto ai 0.002 del limo, in modo da creare uno scheletro di diverse dimensioni saldamente aggregabile dall'argilla. Una eccessiva quantità di sabbia nell'impasto, ovvero una quantità di argilla insufficiente, renderà l'intonaco polveroso; se si lascia scorrere la mano sull'intonaco una volta asciutto, si staccheranno granelli di sabbia. Questo effetto sarà tanto maggiore, quanto più la quantità di argilla risulterà insufficiente a tenere insieme la sabbia. Se al contrario, è la quantità di sabbia ad essere insufficiente, e quindi l'argilla in eccesso, l'intonaco asciugandosi subirà un eccessivo ritiro, che darà luogo alla formazione di fessure, tanto più numerose e profonde, quanto maggiore risulterà l'eccesso di argilla nell'impasto. E' comunque possibile intervenire su un intonaco già asciutto o in fase di essiccazione segnato da fessure da ritiro, eliminando le crepe con una pittura di barbotina (una miscela di acqua e terra piuttosto fluida) o rilavorando l'intonaco, anche più volte, con un fratazzo a spugna o una spugna umida, in quanto è sufficiente inumidire l'intonaco per rendere

l'impasto nuovamente plastico e quindi lavorabile.

Non è possibile fornire indicazioni generalmente valide circa le percentuali di argilla corrette per una buona miscela, in quanto queste dipendono sia dalla qualità dell'argilla (vedi... "la composizione delle terre"), sia dal tipo di sabbia impiegata ed in particolare dalla sua granulometria, più grossa è la sabbia, maggiore deve essere la percentuale argillosa.

Sono di seguito indicate, percentuali delle diverse componenti che caratterizzano diverse malte in commercio in Europa:

7-9% argilla

15-25% limo

60-75% sabbia

5% ghiaietto

Come si può vedere, una terra sabbiosa è la terra ideale per la realizzazione di intonaci. Per realizzare intonaci con terre argillose, sarà necessario smagrirle aggiungendo sabbia fino a tre volte il volume della terra.

Individuare la corretta quantità di acqua da aggiungere ad un'impasto non richiede speciali competenze; l'acqua sarà aggiunta in quantità tale da rendere l'impasto della consistenza idonea alla messa in opera; per quanto riguarda invece il rapporto tra limo, sabbia e argilla, è necessario indagare le specifiche proprietà meccaniche della terra.

In primo luogo, si effettueranno le *analisi preliminari* descritte nel capitolo 1.2 sul riconoscimento delle terre, che ci daranno le prime indicazioni sulle qualità meccaniche dalla terra e sul suo contenuto di argilla. Quindi si effettueranno dei test mettendo a confronto diversi campioni di intonaco, realizzati con diverse percentuali di sabbia e argilla.

In occasione del workshop organizzato dall'associazione

“genus loci” a Casalpusterlengo nel maggio 2004, condotto dagli architetti Sergio Sabatini e Guglielmina Bardiani, effettuammo le analisi su indicate ponendo a confronto diversi tipi di terreni e di miscele ottenute con terre locali, con terre prelevate in diverse regioni e confrontate infine con composti premiscelati prodotti da ditte specializzate ([Geosana e Claitec](#)). Dalle analisi preliminari, il terreno prelevato in luogo, appunto a Casalpusterlengo, si rivelò essere abbastanza argilloso, di qualità meccaniche mediamente buone (nella zona infatti era piuttosto diffuso l'uso di murature in mattoni crudi fino all'inizio del secolo). La qualità argillosa della terra suggeriva senza dubbio la necessità di doverla smagrire con sabbia per ottenere un buon composto. Furono preparate più miscele:

1° - di sola terra locale e acqua

2° - 1 parte di terra; 1 di sabbia e acqua

3° - 1 parte di terra; 1+1/2 di sabbia e acqua

4° - 1 parte di terra; 2 parti di sabbia e acqua

5° - 1 parte di terra e 3 parti di sabbia

Su un pannello di eraclit sono state individuate 5 aree rettangolari sulle quali è stato realizzato uno strato di intonaco dello spessore di 2cm. In seguito a due giorni di essiccazione, sul primo campione si erano aperte profonde fessure dovute ad un eccessivo ritiro, il secondo campione presentava lesioni da ritiro molto meno profonde, dal terzo campione in poi non si formarono fessure, ma il quarto campione, ed ancora più il quinto campione, dava evidenti segni di insufficiente coesione, era infatti sufficiente un leggero contatto con la mano per causare il distacco della sabbia più superficiale. La terza miscela si presentava più equilibrata, ma le fessurazioni apparse sul secondo campione erano di lieve entità, con una seconda lavorazione con fratazzo a spugna, sarebbe

risultata perfetta, offrendo migliori garanzie di stabilità rispetto alla terza miscela grazie alla maggiore quantità di argilla (vedi foto n°...)

E' anche possibile aggiungere all'impasto ***fibre*** o altri ***stabilizzanti*** (nel caso dell'uso di terra del luogo o addirittura proveniente dallo scavo di fondazione e non di una terra analizzata preventivamente) può essere dettata da molteplici necessità: la formazione di uno scheletro che aiuti a resistere ai movimenti dovuti a variazioni termiche o igrometriche (sabbia, ghiaietto, fibre vegetali e naturali...), la necessità di impermeabilizzare (calce, cemento, bitume...) la necessità di diminuire la densità dell'impasto (fibre...), la necessità di aumentare la resistenza ad abrasione e a trazione (fibre vegetali)...

- inerti minerali: oltre alla sabbia si possono utilizzare altri inerti minerali per la preparazione di malte per intonaci quali: polveri di argilla espansa, di pietra, di tufo, pomice, vermiculite, cocchiopesto, polvere di marmo, sabbiature di mattoni cotti e polveri ricavate da altri materiali naturali. Questi inerti vengono utilizzati per alleggerire l'impasto, per aumentare le proprietà di isolamento termico, per ottenere particolari effetti acustici, o per ragioni estetiche.

- inerti vegetali: l'aggiunta di fibre vegetali quali paglia di grano, orzo, cocco, , fibre di juta, lino, canapa, pula di riso ecc. migliora l'isolamento termico e alleggerisce l'intonaco. Le fibre utilizzate nello strato di intonaco base migliorano l'aggrappo e creano un'armatura che aumenta la resistenza a trazione dell'intonaco, evitando inoltre il problema delle fessure da ritiro durante l'essiccazione.

Possono essere impiegati anche trucioli di legno, segatura, cellulosa...

- inerti di origine animale: crini o peli di cavallo o altri

animali.

-stabilizzanti: la calce naturale, così come il cemento, vengono spesso impiegati per aumentare le capacità impermeabilizzanti di un intonaco a base di argilla. Il dosaggio ottimale di cemento è intorno al 6% e non supera il 12%.

Preparazione del sottofondo

Le malte per intonaci a base di terra possono essere applicate su tutti i tipi di superficie: mattoni cotti, blocchi crudi, pisé, blocchi di cemento, fondi di cemento, legno o pannelli isolanti di vario tipo.

Gli intonaci in terra si aggrappano solo per un effetto meccanico per cui il supporto deve essere asciutto (bisogna verificare che non vi siano infiltrazioni), saldamente ancorato al fondo e privo di punti di degrado, inoltre la superficie deve essere priva di polveri e piuttosto scabrosa o ruvida.

Se la superficie del sottofondo è liscia deve essere preparata adeguatamente, per esempio: le superfici in terra compattata, cioè con una porosità superficiale ridotta, come per il pisé, devono essere “graffiate” con piccoli rastrelli metallici in modo da creare la rugosità necessaria all’adesione dello strato di intonaco; con fondi in cemento si deve piccozzare la superficie in modo da creare punti di aggrappo, oppure si può applicare un collante naturale a base di caseina, calce e sabbia che crea il necessario aggrappo; lo stesso trattamento è necessario per fondi in gesso; le murature in mattone cotto, se sono molto regolari, possono essere preparate asportando una piccola parte della malta cementizia che si trova tra i mattoni.

Su questi tipi di sottofondi, ma anche sulle murature in

mattoni crudi, bisogna eseguire un'accurata pulitura della superficie con una spazzola robusta, con un pennello bagnato in acqua oppure con una pistola a spruzzo per eliminare ogni traccia di polvere.

A questo punto la superficie da intonacare deve essere bagnata con una barbottina acquosa (una miscela di terra piuttosto grassa e acqua) per creare coerenza tra il fondo asciutto e la malta bagnata ma soprattutto per rallentare i tempi di essiccazione dell'intonaco. Nel caso l'applicazione dell'intonaco si eseguisse con un'intonacatrice a spruzzo il sottofondo non deve essere bagnato.

Per assicurarsi un buon aggrappo è possibile fissare reti portaintonaco (in: iuta, canapa, fibra di vetro, ferro zincato, plastica, stuoie di cannucciato ecc.) alla superficie prima di intonacare; in questo caso bisogna fare attenzione che non si formino bolle d'aria tra la rete e l'intonaco causando distacchi, infatti nel caso di reti a trama fitta, come la iuta o il cannucciato, è meglio disporre un sottile strato (max 0,5 cm) di malta di terra sulla quale si immerge la rete prima di procedere alla posa dell'intonaco.

- intonaco a base di argilla applicato su pareti radianti: i pannelli per riscaldamento a parete si prestano ottimamente per essere intonacati in terra, sia per la proprietà di inerzia termica della terra sia per la resistenza alle alte temperature di questo materiale, che consente un riscaldamento efficace dell'ambiente, permettendo inoltre un risparmio energetico e partecipando al mantenimento della salubrità dell'habitat.

Schematizzando quanto fino ad ora detto, possiamo distinguere le seguenti fasi nella produzione delle malte per intonaci a base di argilla:

Le diverse fasi di produzione delle malte per intonaci a base di argilla

Scavo

E' possibile utilizzare terre di scavo purché rientrino nel fuso granulometrico ideale: la componente argillosa, deve essere il 5-12%, ottimo il 10%.

Si possono utilizzare anche terre con una maggiore percentuale di argilla, purché smagrite con sabbia della granulometria necessaria al caso.

Vaglio

La setacciatura è molto importante per ottenere una terra dalla granulometria ottimale, senza la quale l'applicazione dell'intonaco risulta difficoltosa.

La terra deve essere secca o comunque avere una bassa percentuale d'umidità per poter essere vagliata accuratamente eliminando sassi, ghiaia e tutte le componenti di diametro >2 mm.

E' possibile effettuare un'ulteriore setacciatura, con setaccio di maglia più fine per ridurre ulteriormente la granulometria e ottenere intonaci da utilizzare per lo strato di finitura (spessore max. 0,5 cm).

Preparazione di eventuali fibre aggiuntive

Si possono utilizzare diverse fibre quali paglia di grano, di orzo, di miglio, o fibre di noce di cocco, di juta, canapa, peli e crine di diversi animali, ma anche segatura o trucioli di legno e fibra di cellulosa ricavata dal riciclaggio della carta. Le fibre devono essere seccate e tritate secondo la necessità e il tipo di fibra: per la realizzazione di intonaci di fondo si possono utilizzare fibre di lunghezza superiore ai 2 cm, arrivando anche a lunghezze comprese tra i 5 cm e i 10 cm; negli intonaci di finitura le fibre devono essere tranciate e cardate soprattutto quelle a struttura tubolare e non devono superare i 2 cm di lunghezza e 0,2 mm di

spessore.

Le diverse fasi di messa in opera di intonaci in terra

Gli intonaci in terra possono essere applicati con frattazzo e cazzuola, oppure a spruzzo con intonacatrici industriali; la malta di terra può essere preparata artigianalmente o acquistata presso ditte specializzate soprattutto se si utilizzano le intonacatrici industriali.

Con 1 mc di terra si realizzano 80 mq di intonaco di 1 cm di spessore.

Miscela a secco

Se si aggiungono sabbia o fibre di qualsiasi genere è opportuno eseguire una miscelazione a secco delle diverse componenti.

Miscela con acqua

Per 25 kg di terra secca occorrono circa 4-6 litri di acqua; si possono utilizzare tutti i tipi di betoniere (anche se non danno risultati ottimali), impastatrici meccaniche o il miscelatore ad elica se si dispone di miscele ben polverizzate; in quest'ultimo caso conviene impastare ulteriormente con la cazzuola, o con la pala in un contenitore adeguato.

Se possibile, lasciare riposare l'impasto prima della posa per ottenere una maggiore facilità di applicazione.

Preparazione del sottofondo

Il sottofondo deve essere asciutto, privo di polveri e sufficientemente ruvido per creare una buona base di aggrappo.

Sottofondi troppo lisci devono essere graffiati o picozzati in modo da creare dei punti di aggrappo; altrimenti si ricorre ad un aggrappante a base di caseina, calce e sabbia fine.

La superficie deve essere bagnata con una barbotina

acquosa poco prima dell'applicazione. Se l'intonaco viene applicato con intonacatrice a spruzzo la parete non deve essere bagnata.

Se si utilizzano reti di aggrappo bisogna valutare se è necessario eseguire un rinzafo prima di fissare la rete; la rete è necessaria se si eseguono pareti di grandi dimensioni intonacate a spruzzo.

Applicazione a spruzzo

Si stende un primo strato di rinzafo e dopo mezz'ora, se il clima è secco, si può eseguire lo strato di finitura. G. Mincke ha sviluppato con successo una miscela per intonaci leggeri con l'aggiunta di fibre e cellulosa che viene steso in un unico strato di 3 cm di spessore.

Applicazione manuale

Qualsiasi tipo di intonaco a base di terra, sia in interno che in esterno, deve essere steso a strati progressivamente più magri e meno rigidi rispetto alla parete e agli strati sottostanti; dopo aver completato l'esecuzione di uno strato bisogna attendere la completa essiccazione (0,30-24 h) prima di eseguire lo strato successivo.

Si applica un primo strato di rinzafo di spessore variabile, 0,3-1 cm (più sottile se si tratta di malte grasse e più spesso con malte magre), e si tira con il frattazzo; ad essiccazione avvenuta si esegue uno strato di intonaco base di circa 1 cm di spessore (max 1,5 cm) quindi lo strato di finitura di granulometria più fine (0-1,2 mm) e di spessore 0,3-0,5cm.

... sugli intonaci manca ancora un bel po' ed intere parti sarebbero da rivedere...

Parte II

COSTRUZIONI IN TERRA IN ZONA SISMICA

INTRODUZIONE

Negli ultimi 70 anni, abbiamo assistito ad un notevole aumento delle attività sismiche, ogni anno terremoti catastrofici si sono manifestati con una frequenza crescente, persino nelle aree in cui il rischio sismico è da sempre ritenuto nullo o trascurabile come in Gran Bretagna, si è registrata un insolita attività tellurica: tra il 2002 ed il 2003 sono state registrate diverse scosse di magnitudo 4.8 della scala Richter, si tratta di un fenomeno del tutto nuovo in queste regioni.

L'Italia è stata pienamente interessata da questo fenomeno, in seguito al quale si è provveduto ad aumentare la classe di rischio sismico praticamente su tutto il territorio nazionale.

Uno dei requisiti indispensabili ad una struttura da realizzare su suolo italiano è quindi la sua capacità di resistere ad eventi sismici e proprio l'assenza di parametri attraverso i quali definire il grado di vulnerabilità sismica di una costruzione in terra cruda, costituisce ad oggi uno dei maggiore ostacoli alla diffusione delle costruzioni in terra in Italia.

Una costruzione ha una soddisfacente resistenza sismica quando è in grado di:

- subire danni minimi durante sismi di minore entità
- subire danni “riparabili” durante sismi di entità media
- di garantire danni minimi alle persone durante sismi di eccezionale entità, anche riportando danni irreversibili alla struttura, tali da pregiudicarne l'utilizzo futuro.

Purtroppo il comportamento sismico delle strutture fragili come le murature in mattoni, in cemento ed in terra cruda non rinforzate, è caratterizzato da crolli improvvisi, il che comporta un rischio di perdita di vite umane troppo alto. Questo porta a considerare le strutture in muratura non rinforzata tra le costruzioni a massimo rischio sismico. E' anche vero però che tante antiche strutture murarie hanno resistito secoli sopravvivendo ad eventi sismici di portata eccezionali.

Ad oggi mancano però strumenti di calcolo affidabili attraverso i quali prevedere il comportamento sismico delle strutture in muratura.

In effetti la definizione di modelli matematici attraverso i quali prevedere (con una certa approssimazione) il comportamento di una struttura sottoposta a tutte le possibili sollecitazioni, incluse le sollecitazioni sismiche, è una conquista recente delle scienze delle costruzioni. Risalgono agli inizi del '900 i primi tentativi di fornire, attraverso una serie di indicazioni e di dettagli costruttivi, delle linee guida per realizzare strutture in grado di resistere meglio ai sismi.

La prima misurazione delle oscillazioni telluriche durante un terremoto è avvenuta solo nel 1933, mentre risalgono agli anni '70 i primi rapporti scientifici sui danni riportati dagli edifici in seguito a terremoti, nel tentativo di risalire, attraverso l'analisi dei danni, alla dinamica che ha prodotto i cedimenti strutturali.

Gli studi moderni sul comportamento sismico delle strutture, si sono sviluppati quindi contemporaneamente al nascere delle nuove tecniche costruttive basate sull'uso di strutture in acciaio e cemento armato.

Negli anni '60 si sviluppò la nozione di "ductile design", che operò una sostanziale "rivoluzione concettuale", fondando la progettazione sismica sulla capacità di un sistema strutturale di reagire come un corpo duttile, continuando a sopportare carichi e a reagire alle sollecitazioni sismiche anche dopo aver subito i primi cedimenti (deformazioni plastiche). L'acciaio è un materiale estremamente duttile come duttile è il cemento armato quando le armature sono alloggiare in modo appropriato, entrambi quindi rispondono pienamente ai requisiti richiesti da questo tipo di progettazione.

Prima di sviluppare modelli per il comportamento delle strutture "duttili" in fase post-elastica, la progettazione strutturale in zona sismica consisteva nel dimensionare le strutture perché fossero in grado di resistere ai carichi laterali prodotti dai terremoti (in funzione del peso proprio della costruzione, della sua geometria, del carico sismico previsto, ecc). I calcoli per la resistenza strutturale, non sono cambiati, ma si sono aggiunte una serie di norme finalizzate a rinforzare alcuni elementi della struttura, soprattutto le giunture, in modo tale che questa sia in grado di trasmettere i carichi anche dopo aver subito i primi cedimenti, le prime deformazioni plastiche.

Il criterio che sottende oggi la progettazione strutturale antisismica è quello di realizzare strutture che reagiscano in modo elastico alle onde sismiche minori, minimizzando i danni prodotti da terremoti di minore entità, e progettare i singoli elementi e le loro giunture in modo da reagire come un corpo duttile durante terremoti di eccezionale entità, resistendo alle sollecitazioni anche dopo aver subito cedimenti e garantendo la sopravvivenza degli occupanti anche riportando danni irreversibili.

LE COSTRUZIONI IN TERRA IN ZONA SISMICA NEGLI STATI UNITI

Negli Stati Uniti, in particolare nel Nuovo Messico ed in California, il tema delle costruzioni in terra è di enorme interesse, tanto per il problema della conservazione delle antiche costruzioni in adobe, la cui sopravvivenza è messa continuamente a rischio dai grandi terremoti che periodicamente interessano l'area, tanto per il rinato interesse per le costruzioni in terra, la cui domanda è in continua crescita.

Negli anni '70 alcune imprese di costruzione realizzarono le prime case unifamiliari in terra cruda nel Nuovo Messico; si trattava di abitazioni in adobe dal costo piuttosto elevato. L'iniziativa intendeva sfruttare la recente domanda di case "environmentally friendly" (a basso impatto ambientale) diffusa nella classe medio alta, non che la moda nascente di case in stile country, ispirato alle antiche costruzioni in adobe dei coloni spagnoli.

La domanda di abitazioni in terra invece di spegnersi col tempo, come prevedeva chi attribuiva il nuovo "fenomeno" ad una moda transitoria è andata aumentando, ed ha spinto le imprese verso la sperimentazione di nuove tecniche costruttive per ridurre i costi ed i tempi di esecuzione dei manufatti in terra.

Le costruzioni in adobe erano molto diffuse nelle regioni del sud est degli U.S.A. ai tempi dei primi insediamenti dei coloni spagnoli. Molti centri storici del New Mexico sono interamente costruiti in terra ed oggi sono protetti da leggi di tutela paesistica, che impongono alle nuove costruzioni di uniformarsi ai vecchi sistemi costruttivi, sia per salvaguardare il carattere paesistico dell'insieme, sia per ritrovare una tradizione costruttiva che oltre ad avere

un bassissimo impatto ambientale, ha dimostrato negli anni di garantire un ottimo livello di confort abitativo, decisamente migliore delle moderne costruzioni a bassa inerzia termica, del tutto inadeguate al clima locale. (fig._)

Le proprietà termoigrometriche del materiale, rendono le costruzioni in terra estremamente confortevoli, riducendo notevolmente i costi di gestione legati alla climatizzazione degli ambienti. Questo fattore, unito al desiderio di rinnovare un'antica tradizione costruttiva, ha dato il via al formarsi di una vera e propria cultura della terra, che si è estesa ad altri stati della costa occidentale tra cui la California, dove il problema della resistenza sismica delle strutture è ovviamente alla base di qualsiasi progettazione strutturale.

Non esistono indicazioni precise riguardo agli standard per le costruzioni in terra nello Uniform Building Code che regola le costruzioni nelle zone sismiche della costa occidentale degli Stati Uniti, ma esistono dei margini di discrezionalità che affidano ai sovrintendenti locali la responsabilità di verificare la sicurezza di strutture diverse da quelle per cui già esiste una normativa definita. Questa flessibilità del codice normativo statunitense, è molto importante per aprire spazi alla sperimentazione, ovviamente sempre all'interno di ampi margini di sicurezza, nessun sovrintendente sarebbe disposto ad assumersi un rischio "eccessivo" autorizzando costruzioni la cui sicurezza non sia ampiamente dimostrabile. Si è così venuta a consolidare una "prassi costruttiva per le costruzioni in terra in zona sismica", documentata e divulgata attraverso una gran quantità di pubblicazioni indirizzate a proprietari, ad "autocostruttori" e ad imprese", pubblicazioni non scientifiche ma spesso estremamente chiare¹. Questa prassi consiste nel rinforzare le strutture in terra con l'uso di armature in ferro, di cordoli, travi e pilastri in

¹ Ad esempio vedi Bruce King (1997), *Building of earth and straw*, Ecological design press, California.

cemento armato, la stabilizzazione del materiale con una certa quantità di cemento, tutti sistemi che di fatto riconducono le strutture in terra a schemi di comportamento sismico tradizionali, ovvero alla progettazione di strutture duttili, con un notevole aumento dei costi di costruzione, ed una notevole riduzione delle qualità intrinseche delle strutture in terra a partire dall'igroscopicità.

I limiti di una diffusa prassi costruttiva per il consolidamento delle strutture in terra in zona sismica

Le maggiori perplessità riguardo la correttezza di molte metodologie oggi utilizzate per rinforzare le murature in terra in zona sismica (sollevate spesso dagli autori stessi della manualistica a cui accennavo prima), vengono dal fatto che i criteri utilizzati non nascono da studi specifici sul materiale.

Ogni materiale ha caratteristiche intrinseche legate alla sua specifica composizione fisica e chimica

Alla base dello sviluppo delle tecnologie specifiche di un materiale, è la conoscenza delle sue caratteristiche, in modo da ottimizzare le sue prestazioni e superare i suoi limiti attraverso una progettazione appropriata.

Le prestazioni di un materiale si possono migliorare entro certi limiti con opportuni trattamenti.

Le qualità igroscopiche dell'argilla sono qualità essenziali ed imprescindibili della terra cruda, nella terra deve sempre essere presente un quantitativo minimo di acqua, per attivare le capacità leganti della argilla. Questo contenuto d'acqua rende inappropriato l'uso di rinforzare le murature in terra inserendovi all'interno barre in ferro o acciaio, in quanto in un ambiente umido non darebbero sufficienti garanzie di durabilità, inoltre non esistono studi specifici sulla capacità della terra di fare presa sulle armature in ferro. Il fatto che la terra si presti a lavorazioni simili a quelle del calcestruzzo, non è sufficiente per ipotizzare un possibile uso della terra con rinforzi in ferro, come avviene per il calcestruzzo armato.

L'igroscopicità rende incompatibile l'uso della terra con quello di materiali impermeabili.

E' indiscutibile il fatto che rivestire una muratura in terra con un intonaco o un altro materiale non traspirante ne

determina il rapido deterioramento. E' successo tante volte nel corso di tanti disastrosi interventi di restauro condotti nell'ultimo secolo, e lo si vede di continuo nei maldestri, eppure tanto frequenti tentativi di coprire le tracce di umidità prodotte da infiltrazioni con lastre di cemento o altri materiali impermeabili che impediscono la traspirazione delle superfici dei muri in terra. Se l'acqua assorbita dalla terra non può asciugarsi, la terra si deteriora perdendo la sua capacità di coesione.

Per proteggere le murature è sufficiente uno strato di intonaco in terra. L'intonaco offrire una valida protezione alle strutture in terra, non deve essere forte ne duraturo, ma al contrario, deve rappresentare una superficie sacrificale. I "guasti" prodotti dall'umidità da infiltrazione ad esempio, possono essere ridotti proprio dalla presenza di un intonaco con una densità piuttosto bassa ed una igroscopicità maggiore di quella delle murature. In questo caso l'intonaco assorbe l'umidità del muro, agendo da superficie sacrificale. Se l'intonaco avesse meno capacità igroscopiche della muratura, avverrebbe esattamente il contrario, e sarebbe la struttura muraria a rovinare, agendo da superficie sacrificale.

Il cemento è un materiale impermeabile, ne deriva che l'uso di intonaci cementizi è assolutamente inappropriato su strutture in terra in quanto certamente dannoso. In questo modo va escluso anche l'uso di reti elettrosaldate per migliorare la compattezza delle murature in terra, in quanto senza la protezione del cemento, a contatto con l'umidità della terra il ferro della rete non avrebbe lunga durata. Ma lo stesso si potrebbe dire del ferro contenuto in travi, montanti, architravi in cemento armato: sottoposte a sollecitazioni sismiche di una certa rilevanza, le strutture in cemento armato (che hanno peraltro una rigidità maggiore rispetto a quella delle murature in terra), intervengono

come nell'intenzione del progettista assorbendo la maggior parte dei carichi della struttura in modo elastico, ma subiscono microlesioni nel cemento, minime magari, ma saranno comunque un sicuro veicolo di umidità per le armature in ferro².

Se per mantenere sana una muratura in terra è così importante assicurarne una buona traspirazione, come si giustifica la “stabilizzazione” con il cemento? Prima di tutto dovremmo chiarire il significato di stabilizzazione.

La quantità di cemento che si aggiunge per “stabilizzare” la terra varia tra il 4 ed il 12 % del volume totale dell'impasto di terra³ da “stabilizzare” il cemento aumenta solo minimamente la capacità portante della terra. Una terra troppo limosa non raggiungerà mai buone capacità portanti, anche se addizionata con una grossa quantità di cemento: il limo diluisce il cemento, e ne limita la capacità legante; se il contenuto di argilla è molto alto, l'argilla e il cemento non legano più insieme, l'argilla forma grumi che vanno a costituire zone di bassa resistenza nel materiale; da una terra molto ricca di argilla, addizionata con la giusta quantità di sabbia, si otterranno ottime capacità portanti, anche senza l'aggiunta di cemento; se la miscela della terra non è adatta alla realizzazione di strutture o non è ben miscelata, il cemento non può cambiare le cose.

L'obiettivo di chi aggiunge cemento alla terra è probabilmente quello di ridurre la sua vulnerabilità all'acqua, aggiungendo un materiale impermeabile alla terra; ma impermeabilizzare la terra sarebbe un assurdo, significherebbe alterare una qualità essenziale del materiale.

² . Tolles, Kimbro, Webster e Ginell (2000)” Final Report of the GSAP”

³ B.King (1997), *Building of earth and straw*, Ecological design press, California.

Per molti anni enti pubblici e privati, come il Getty Conservation Institute di Los Angeles, L'Università Cattolica del Perù, lo U.S. National Park Service, le Ecole d'Architecture de Grenoble e tanti altri hanno investito grosse risorse nel tentativo di individuare additivi in grado di migliorare le prestazioni della terra cruda in termini di durevolezza, cercando un modo per impermeabilizzare la terra, addizionandola con asfalto, silicati etilici, olio di scarto dei motori, polimeri acrilici, cemento e tanto altro, ma la maggior parte degli enti di ricerca, dopo un gran numero di fallimenti, oggi concorda sul fatto che i migliori risultati per durabilità e sicurezza, restano ad oggi quelli ottenuti con le tecniche tradizionali⁴.

La terra è un materiale stabile, non necessita di alcuna "stabilizzazione".

Certo la quantità d'acqua al suo interno varia al variare della percentuale di umidità dell'aria, alterando minimamente le caratteristiche fisiche del materiale, ma tante strutture secolari in adobe testimoniano che l'alternarsi dei cicli termici durante il giorno e della percentuale di umidità dell'aria, non costituiscono alcun problema per le murature in terra, l'importante è che nessun materiale impermeabile impedisca all'umidità di asciugarsi.

Certo una forte umidità di risalita può pregiudicare le caratteristiche del materiale condizionando finanche la statica delle murature in terra (come descritto più avanti), ma questo problema va affrontato a monte con una buona progettazione. La durabilità di una costruzione in cemento armato come in acciaio o in qualsiasi muratura è sempre funzione della sua corretta progettazione, della sua

⁴ .Edward Crocker_Earthen Architecture and Seismic Codes; Lessons from the Field: Building and Repairing Durable Earthen Structures
<http://www.icomos.org/iwc/seismic/Crocker.pdf>.

corretta realizzazione, e della qualità dei materiali utilizzati.

Le tecnologie tradizionali della terra, piuttosto che tentare di impermeabilizzare le strutture, sono caratterizzate da un'insieme di attenzioni volte a migliorare le capacità delle murature di asciugarsi. Ad esempio, una cura particolare era posta nel sistema di allettamento dei mattoni in adobe nelle murature: estratti dal loro stampo in legno, i mattoni in adobe presentano, a causa del ritiro del materiale, la superficie che è stata sul fondo dello stampo leggermente convessa, e la superficie esposta all'aria leggermente concava, con gli spigoli rialzati. Nella costruzione dei muri i mattoni venivano disposti uno sull'altro facendo attenzione che la parte concava risulti essere verso il basso, accogliendo meglio la malta⁵, e la parte convessa, resti verso l'alto, consentendo una migliore aderenza al mattone soprastante, ma soprattutto consentendo all'umidità della malta di scivolare sulla convessità del mattone più facilmente verso l'esterno, una disposizione invertita dei mattoni, porterebbe l'umidità a ristagnare più a lungo al centro della muratura.

Per migliorare la resistenza dei setti in adobe si prescrive anche l'uso di malta stabilizzata con il cemento. In questo caso, dal momento che la malta è meno permeabile dei mattoni, l'umidità della malta verrà assorbita da questi, se poi viene eseguito un intonaco di finitura non molto permeabile, si ha il risultato di ingabbiare i mattoni in una struttura semi impermeabile, che porterebbe la muratura ad un sicuro rapido degrado.

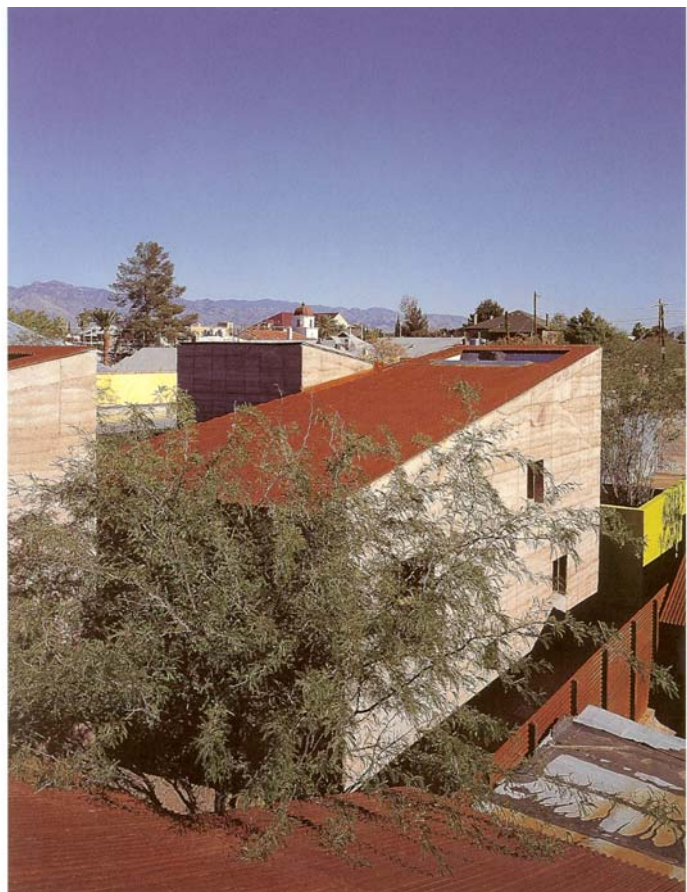
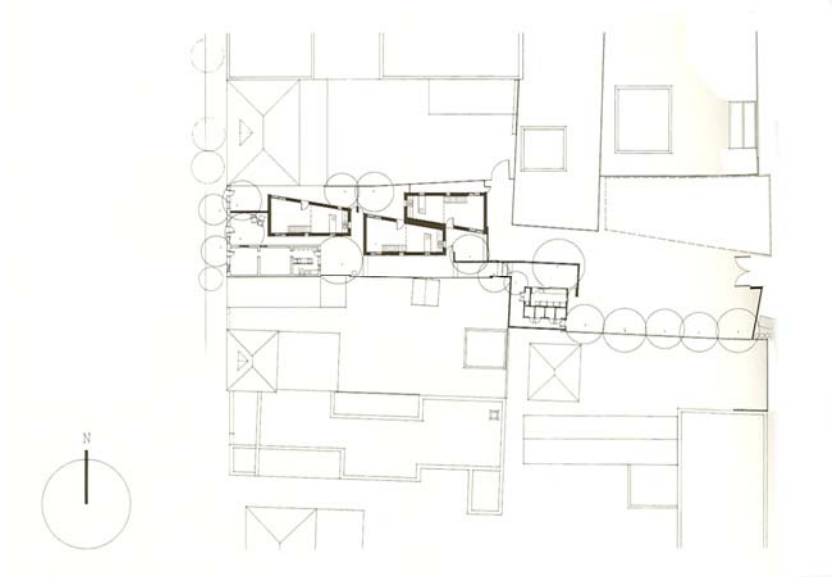
⁵ . In Iran è tradizione imprimere sulla faccia superiore dell'adobe nello stampo, ovvero sulla faccia concava, il segno della mano del produttore del mattone; questo per aumentare la capacità della superficie concava del mattone di alloggiare la malta.

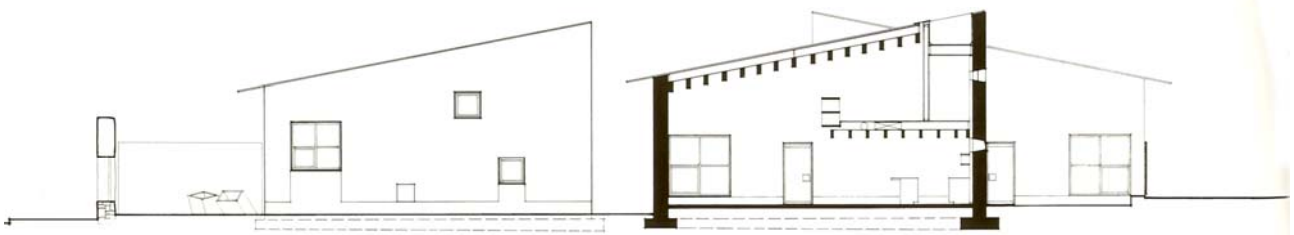
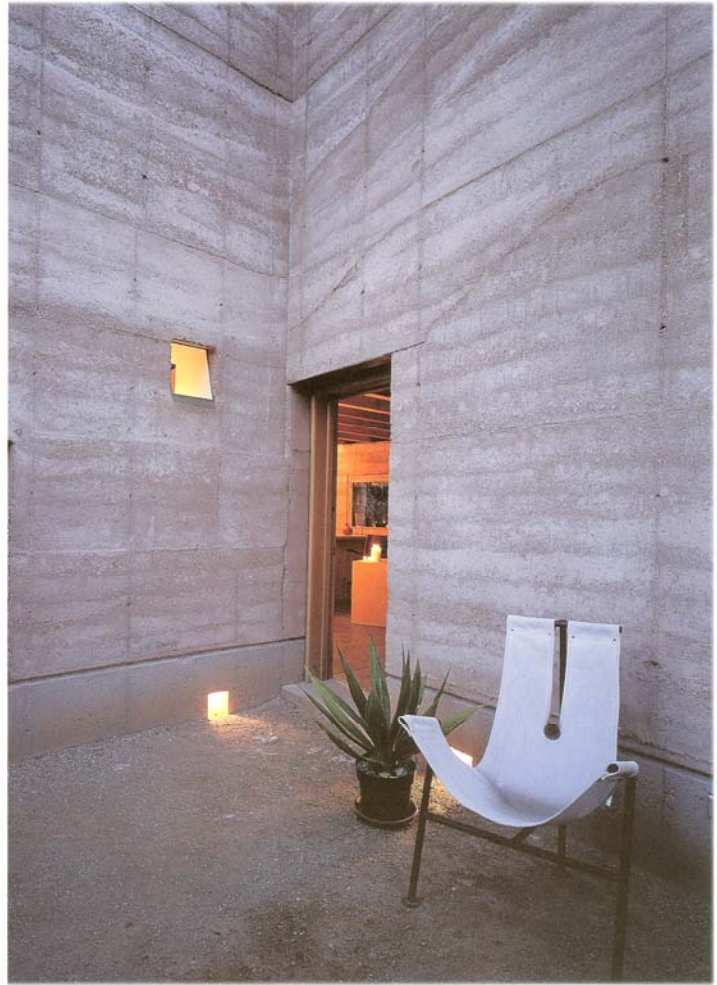
Nonostante si siano raggiunte adeguate conoscenze scientifiche attraverso studi condotti dai più autorevoli centri di ricerca sulla inopportunità di consolidare le strutture in terra stabilizzandole con cemento o con l'inserimento di barre in acciaio, ferro o elementi strutturali in cemento armato, molte di queste prescrizioni sono ancora riportate nella manualistica, o compaiono nei codici normativi. Il problema riguarda la diffidenza rispetto al comportamento statico dei così detti "soft buildings" rispetto ai tradizionali "Hard Buildings"

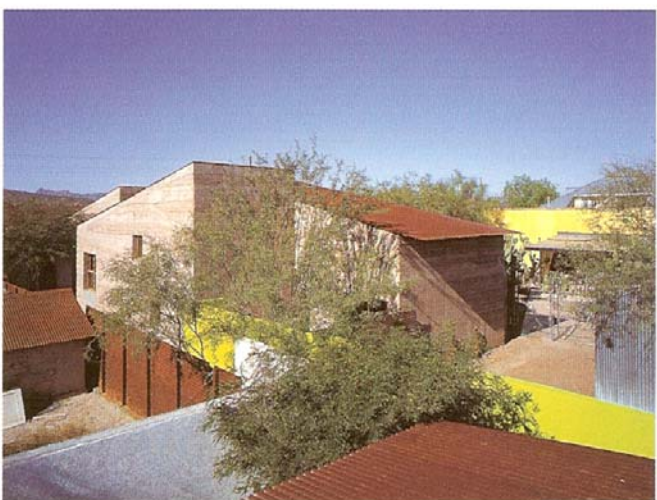
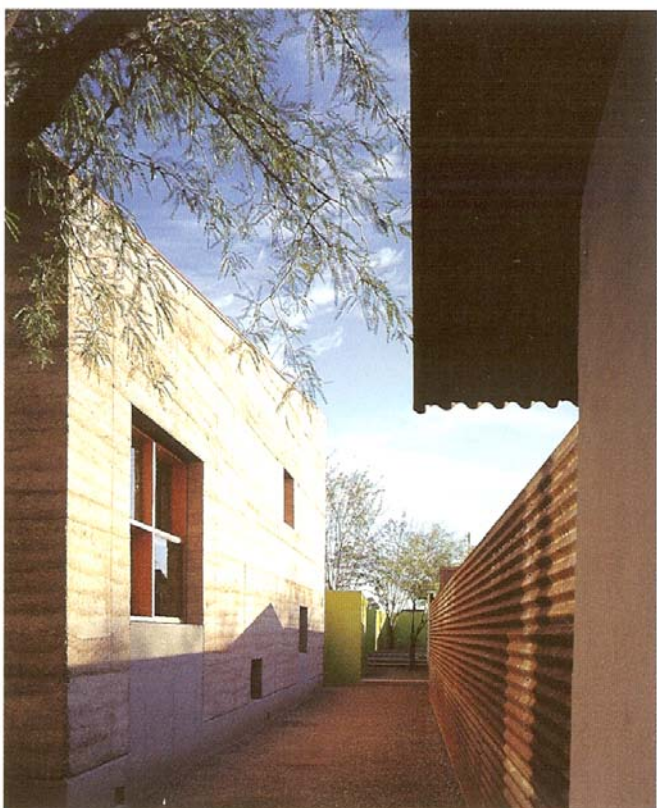
Rick Joy: Desert works

Convent avenue studios

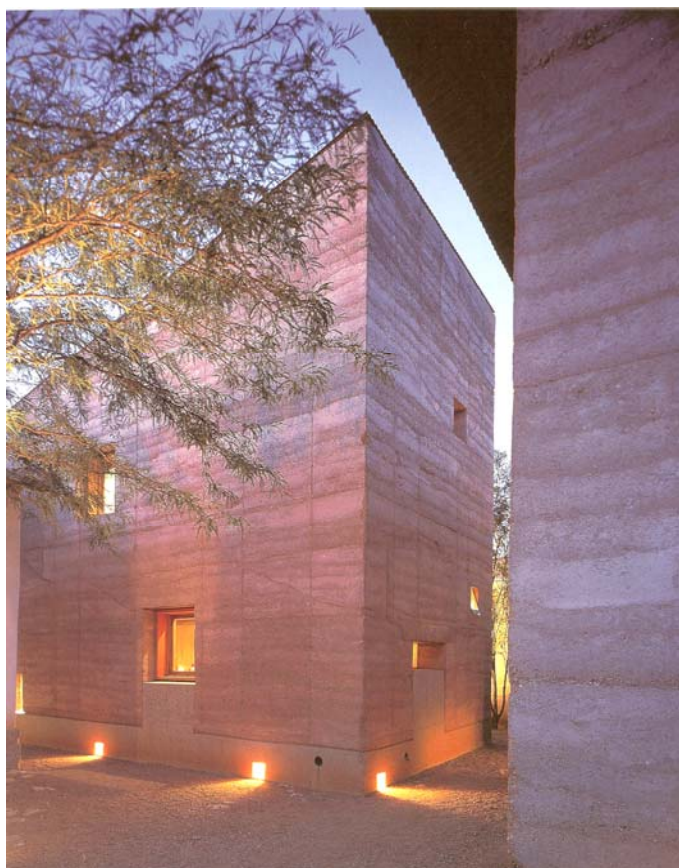
realizzato in uno dei più antichi centri
degli USA – Barrio storico 1995-97











Gli studi del Getty Seismic Adobe Project,

L'iniziativa del Getty Conservation Institut di finanziare una ricerca volta ad individuare nuovi criteri per il consolidamento delle antiche strutture in terra fu discussa la prima volta nel 1990 a Las Cruces nel New Mexico, in occasione del convegno Adobe 90, tenutosi l'anno successivo al terremoto di Loma Prieta, che causò forti danni alle antiche strutture in adobe.

L'aumento dell'attività sismica registrato negli ultimi decenni rendeva necessario mettere a punto un piano di interventi finalizzati al consolidamento delle antiche strutture in terra cruda ed al potenziamento della loro resistenza sismica, sia per salvaguardarle dal rischio di una totale distruzione, sia per tutelare l'incolumità degli utenti.

Il primo requisito che una struttura in zona sismica deve rispettare è quello di assicurare la sopravvivenza delle persone al suo interno durante i terremoti di maggiore entità. Il comportamento sismico delle murature non rinforzate, siano esse realizzate in pietra, mattoni o in terra cruda è caratterizzato da crolli improvvisi, questo comportamento rende molto alta la probabilità di perdita di vite umane. Le murature sono quindi poste tra le strutture a massimo rischio sismico. Perché fosse ancora consentita la fruizione delle vecchie strutture in terra, era quindi necessario consolidarle, per aumentarne la sicurezza sismica.

Purtroppo il consolidamento delle strutture in terra, per soddisfare i criteri di resistenza della progettazione elastica delle strutture in zona sismica prevedeva interventi estremamente invasivi, come l'inserimento di nuovi elementi strutturali con la rimozione di parte del materiale originario e la conseguente perdita di autenticità delle strutture antiche. In altre parole, le strutture vengono distrutte e ricostruite ancora prima di subire danni dai terremoti.

Si poneva così la scelta tra due posizioni in conflitto:

- preservare le strutture nella loro autenticità, aspettando che la loro fine avvenisse per “cause naturali” e non provocata dai restauri stessi, scelta che però avrebbe comportato anche la rinuncia ad ogni tipo di fruizione delle strutture stesse, escludendone qualsiasi uso e permettendo visite al pubblico solo da opportune distanze di sicurezza. Tali condizioni porterebbero certamente ad una perdita di interesse per le antiche strutture, al loro lento inevitabile abbandono e quindi l'inevitabile distruzione per mancanza di manutenzione;
- oppure sottoporle a costosi ed invasivi interventi di consolidamento, che ne avrebbero compromesso l'autenticità.

Il Getty Conservation Institute decise di istituire una commissione di tecnici con l'obiettivo di individuare nuovi criteri per il consolidamento delle strutture in adobe, nel rispetto sia dei criteri di sicurezza imposti dai codici normativi, sia delle istanze di conservazione dei manufatti antichi.

Per rispondere ai requisiti di sicurezza, le metodologie di consolidamento proposte dal “ Getty Seismic Adobe Project” (GSAP) dovevano garantire un rischio minimo per gli occupanti, prevenendo l'instabilità della struttura durante i terremoti di eccezionale entità; per rispondere

alle istanze di conservazione degli antichi siti era necessario che le metodologie di intervento individuate fossero in grado di contenere i danni provocati da terremoti di eccezionale entità a danni riparabili minimizzando i danni dovuti a terremoti di portata minore; il tutto con interventi minimi, non invasivi e reversibili. Gli studi del GSAP partirono dall'osservazione del comportamento statico delle strutture in adobe sottoposte a sollecitazioni sismiche.

Se è vero che molte strutture in terra hanno in occasione di grandi terremoti rivelato una forte vulnerabilità, molte antiche costruzioni, realizzate in zone ad alta attività sismica, hanno invece resistito per secoli superando con danni "accettabili" terremoti di eccezionale entità.

Un interessante campo di indagine è ad esempio la storia degli eventi sismici della California e del loro impatto sulle antiche strutture in adobe realizzate dai coloni spagnoli. La fortezza in adobe di Watsonville, un edificio a pianta rettangolare con mura molto spesse, articolata su due livelli con due pareti divisorie centrali e tetto ligneo a capriata unica, una tipologia piuttosto comune per le strutture in adobe della stessa epoca, ha resistito senza grossi danni al terremoto del 1865 delle montagne di Santa Cruz, a quello nel 1906 che distrusse la città di San Francisco, ed a quello del 1989 di Loma Prieta nella contea di Santa Clara. Durante quest'ultimo terremoto la struttura della fortezza ha riportato diversi danni, come la riapertura di lesioni sulle mura lunghe, ed il crollo parziale della parte superiore del frontone posteriore. Tuttavia la struttura non è andata distrutta nonostante Watsonville fosse proprio sul epicentro del terremoto. Pochi interventi di consolidamento avrebbero probabilmente evitato del tutto i danni subiti.

L'intera cittadina riportò danni considerevoli tanto agli edifici pubblici quanto a buona parte delle abitazioni private.

Altri edifici come la Mission Dolores di San Francisco o la Serra Chappel a San Juan Capistrano in California, hanno avuto una storia simile.



la Mission Dolores di San Francisco

Serra Chappel a San Juan Capistrano in California



L'acciaio ed il calcestruzzo armato sono materiali duttili, hanno proprietà elastiche lineari, e conservano una buona

resistenza anche in fase post elastica; le strutture in acciaio e calcestruzzo armato quindi mantengono una buona resistenza anche dopo la comparsa dei primi cedimenti, proteggendo la vita delle persone all'interno della struttura. Il loro comportamento si può prevedere in modo abbastanza preciso con gli attuali strumenti di calcolo anche in fase post elastica.

Il comportamento dei materiali fragili invece, come le murature non rinforzate in mattoni, pietre, adobe ecc. è molto diverso: quando le strutture cominciano a cedere le lesioni cominciano a formarsi, le mura spaccate lungo le lesioni cominciano a perdere di stabilità ed a muoversi indipendentemente l'una dall'altra, urtandosi e quindi danneggiandosi a vicenda, infine crollano o si ribaltano, solitamente verso l'esterno della struttura se la rigidità dei solai è sufficiente a contenere il ribaltamento verso l'interno. L'esatta previsione del comportamento delle strutture fragili in questa fase è difficile da prevedere anche con gli attuali strumenti di calcolo. Ma fino a quando le strutture murarie restano stabili, anche se gravemente fessurate, sono capaci di sostenere i carichi e l'intera struttura tiene. Il forte spessore delle antiche strutture in adobe rende molto difficile la loro destabilizzazione, anche quando intervengono grosse lesioni, ed il peso delle strutture di coperture, costituisce un ulteriore elemento di stabilità. Riuscire a garantire la stabilità delle murature, vuol dire prevenirne il collasso improvviso, e quindi rispondere al primo requisito di sicurezza, ovvero l'incolumità degli occupanti.

Lo spessore murario delle antiche strutture in adobe è solitamente compreso tra 1.2 m e 1.5 m, ed il rapporto tra l'altezza e lo spessore dei setti è solitamente intorno a 5, il che rende difficile il ribaltamento delle mura all'esterno della struttura.

L'ipotesi del GSAP divenne quella di basare la progettazione degli interventi di consolidamento non su criteri di resistenza ma di stabilità, ovvero individuare tecniche di consolidamento atte a prevenire lo spostamento differenziale delle superfici fessurate.

ESEMPI DI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DI ANTICHE STRUTTURE IN TERRA PRECEDENTI AGLI STUDI DEL GSAP

I metodi usati negli Stati Uniti per il consolidamento delle strutture in terra consistono solitamente nell'inserimento nello spessore stesso delle murature di elementi strutturali duttili per rinforzare le strutture e garantire la loro resistenza sotto l'azione dei carichi provocati dalle scosse sismiche. Un esempio è lo svuotamento della parte centrale delle murature in terra per l'inserimento di setti in cemento armato. Questo tipo di intervento è stato eseguito per il consolidamento delle antiche caserme nel Sonoma State Historic Park, in California.



caserme nel Sonoma State Historic Park, in California

interno di una caserma nel Sonoma State Historic Park



Per il consolidamento del Plaza Hotel a San Juan Bautista in California e del Cooper-Molera Adobe a Monterey, sempre in California, è stato invece realizzato all'interno delle murature, un sistema di travi e pilastri in cemento armato.



Plaza Hotel a San Juan Bautista California

Cooper-Molera Adobe a Monterey, California



Si tratta di interventi di consolidamento estremamente costosi, ma soprattutto invasivi, giustificati dall'intento di rinforzare le strutture e renderle duttili, per rispondere ai criteri di una progettazione basata sui tradizionali criteri della progettazione elastica. Se alle nuove strutture duttili realizzate durante il consolidamento viene affidata la resistenza dell'intera struttura durante un sisma, l'enorme massa delle murature sotto l'azione dei terremoti diventa un enorme carico, maggiore è il peso delle murature, maggiore sarà il carico sismico (per questo motivo la leggerezza diventa un requisito importante per una moderna struttura progettata secondo i criteri della progettazione elastica).

Simili interventi non sono compatibili con le istanze di conservazione dell'antico, sia per la perdita di autenticità delle strutture sia per la irreversibilità degli interventi operati, basti pensare che a pochi anni di distanza dal consolidamento delle strutture descritte, si sono resi evidenti gravi problemi legati alla incompatibilità tra le strutture in terra e le strutture di consolidamento in cemento armato.

La semplice introduzione di travi di bordo in cemento armato nei setti murari in terra al di sotto dei tetti, per

assicurare continuità alla struttura ed un buon contenimento laterale alle murature contro il ribaltamento delle stesse durante i terremoti, (intervento ancora oggi raccomandato dallo State Historical Building Code) è un intervento estremamente invasivo e costoso, che prevede la rimozione dei tetti lignei, la sottrazione di materiale originario, la realizzazione delle travi di bordo in cemento armato, ed in fine il rimontaggio dei tetti lignei. Si è però da tempo osservato che le travi di bordo in cemento armato sono troppo rigide rispetto alle murature in adobe. La differenza di elasticità tra i due materiali causa un pessimo comportamento sismico, ovvero la rapida formazione di lesioni fino all'espulsione di materiale dalle murature al di sotto delle travi, ed il conseguente distacco della trave dal resto della struttura.

Il metodo per il consolidamento delle strutture in adobe basato sulla stabilità, proposto e verificato nella sua efficacia dal GSAP, non tenta di introdurre nuovi elementi strutturali "ausiliari" nelle strutture, ma di sfruttare i pregi e di contenere i difetti delle strutture murarie stesse.

Tale metodo, se bene applicato punta a conservare la capacità di dissipare l'energia sismica propria delle murature in terra, legata sia alla formazione stessa delle lesioni quando consentono movimenti relativi minimi delle superfici lesionate tali da non compromettere la stabilità del sistema strutturale, che alla elasticità propria della terra cruda; ed interviene per assicurare la stabilità delle murature con interventi volti a limitare lo spostamento relativo delle superfici contrapposte delle lesioni. Questi due obiettivi si possono raggiungere con una molteplicità di interventi semplici, poco costosi e poco invasivi.

PRECEDENTI STUDI CONDOTTI CON TEST DINAMICI DI LABORATORIO

Come abbiamo in precedenza sottolineato, il comportamento sismico delle strutture fragili dopo la comparsa dei primi cedimenti, non è prevedibile analiticamente; per verificare quindi l'efficacia dei sistemi di consolidamento basati sui criteri di stabilità proposti del GSAP, era necessario verificare con test dinamici di laboratorio il comportamento sismico delle strutture in adobe prima e dopo gli interventi di consolidamento proposti.

Nonostante la natura globale del problema della resistenza sismica delle strutture in terra, sono decisamente pochi i test dinamici di laboratorio condotti su strutture in terra.

I primi furono condotti in Messico negli anni '70, (Meli Hernandez e Padilla 1980) su 5 modelli realizzati in scala 1:2,5. L'obiettivo dei test era di verificare il comportamento di strutture in adobe rinforzate con travi di bordo in cemento armato, barre di ferro orizzontali e reti elettrosaldate alloggiate negli intonaci sulle pareti esterne. Una lunga campagna di studi è stata condotta presso la Catholic University di Lima, Peru, (Vargas-Neumann ed Otazzi 1981) (Vargas-Neumann, Barriola e Blondet 1984) (Barriola, Bernales 1986). I test, condotti su tavola vibrante, erano indirizzati alla verifica del comportamento di strutture sperimentali, rinforzate con canne di bamboo e travi di bordo in legno.

I primi studi negli Stati Uniti furono eseguiti negli anni '80 presso la Stanford University di Palo Alto, California (Tolles e Krawinkler 1989) per valutare gli effetti sulle strutture in terra di misure di consolidamento molto semplici, osservando il loro comportamento fino al collasso delle strutture. Furono testati 6 modelli senza

tetto in scala 1:5. Modelli in scala maggiore furono testati presso la Berkley University in California, su strutture rinforzate con travi di bordo in legno e vari tipi di reti elettrosaldate sulle pareti esterne. Entrambi i test diedero risultati non soddisfacenti; le misure di consolidamento “leggere” proposte migliorarono la risposta sismica delle strutture testate, ma non furono sufficienti a garantire la resistenza necessaria a superare sismi di grande intensità.

Il GSAP ha prestato grande attenzione alle precedenti ricerche svolte sull'argomento, con l'obiettivo di individuare criteri comuni che rendano confrontabili i risultati delle nuove ricerche con quelle precedenti, ma soprattutto definire con attenzione criteri ai quali anche altre ricerche future possano rapportarsi.

E' fondamentale procedere con continuità nelle ricerche condotte nelle diverse nazioni, per non sprecare risorse, ma soprattutto per ridurre i tempi di soluzione di problemi comuni. Tanto la salvaguardia degli edifici storici, quanto lo sviluppo di tecniche costruttive a basso impatto ambientale, costituiscono temi di rilevanza internazionale.

Le procedure tecniche di consolidamento proposte dal GSAP e la loro verifica con i test dinamici di laboratorio

Il GSAP dopo aver sviluppato nel corso del primo anno di attività (1991) le linee guida della ricerca, iniziò una serie di test dinamici su tavola vibrante, per verificare l'efficacia delle procedure di consolidamento che rispondevano ai requisiti individuati nel primo anno di ricerca ovvero:

- minimo impatto sui manufatti storici e reversibilità degli interventi
- efficacia nel contenere i danni tanto nei forti terremoti quanto in quelli di più lieve entità
- costi e difficoltà di applicazione
- semplicità ed immediatezza della loro applicazione in vista di un loro uso nella stabilizzazione di monumenti danneggiati da eventi sismici
- adattabilità delle soluzioni alle diverse problematiche della conservazione

Sono stati effettuati test dinamici su tavola vibrante su 11 modelli, 9 in scala 1:5 e gli ultimi due in scala 1:2.

I test sui modelli in scala 1:5 sono stati effettuati presso il John A. Blume Earthquake Engineering Center, presso la Stanford University, gli ultimi due modelli in scala 1:2 sono stati testati presso l'Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS) della Università di SS.Cyril and Methodius a Skopje nella Repubblica di Macedonia.

Per i modelli è stata usata una tipologia molto comune nelle costruzioni ispano-americane in adobe (tapanco style), caratterizzata da una pianta rettangolare con un

unico solaio ligneo, due setti murari non portanti che terminano con un frontone triangolare, copertura con tetto in legno su travi inclinate, una trave di colmo, che va da un frontone ad un altro, ed una trave d'appoggio, attraverso la quale il tetto scarica il suo peso sui due muri portanti. Sui primi tre modelli in scala 1:5 è stata verificata la validità del metodo della stabilità teorizzato nel primo anno di ricerca (Tolles et al.1996), durante gli studi sui successivi sei modelli sono state definite e verificate diverse procedure di intervento. I primi modelli erano molto semplificati (mancavano le strutture del tetto e dei solai), per diventare progressivamente più definiti, fino agli ultimi due modelli in scala 1:2 sui quali è stata eseguita la verifica definitiva sulla efficacia degli interventi e sui modelli di sviluppo del quadro fessurativo.

Ogni modello è stato sottoposto a 10 scosse sismiche simulate in laboratorio, ogni scossa simulata di intensità superiore alla precedente. Il tipo di oscillazione provocato è stato stabilito in analogia al terremoto del 1952 della contea di Kern sempre in California. L'ultima scossa simulata, la più forte, era sei o sette volte maggiore di quella provocata dal terremoto del '52, e di intensità comunque superiore a quella del terremoto più forte mai registrato in California. E' stato simulato un terremoto straordinario ma comunque possibile. Questo aggravio delle sollecitazioni imposte ai prototipi è giustificato dal fatto che i prototipi realizzati in laboratorio sono solitamente realizzati con una precisione maggiore rispetto a quella con la quale sono realizzate le normali costruzioni.

La durata delle scosse simulate è stata di 20 secondi, un tempo molto superiore alla reale durata delle scosse lievi, ma decisamente inferiore ai tempi di azione dei terremoti più intensi. Un terremoto di magnitudo 8 della scala

Richter può superare i 60 secondi. Ma il numero delle sollecitazioni consecutive a cui sono stati sottoposti i modelli compensa la minore durata delle scosse. In particolare, l'azione successiva delle ultime tre scosse simulano perfettamente l'azione di un sisma di portata straordinaria.

Le procedure di intervento proposte e verificate dal GSAP consistono nella realizzazione di una serie di elementi verticali ed orizzontali per il contenimento dei movimenti differenziali delle sezioni fessurate, tali da non irrigidire la struttura preservandone l'elasticità:

- Cerchiature con fascia (o laccio) di nylon (nylon strap) sia orizzontali, sia verticali.
- Rinforzi verticali con barre in acciaio o in fibra di vetro fissati nella muratura con resina epossidica
- Travi di bordo, solai in legno e sistemi di ancoraggio del tetto e dei solai in grado di contribuire alla stabilità delle murature, mantenendo un'adeguata elasticità.

Le cerchiature in nylon consistono appunto nel cerchiare con una fascia flessibile o un laccio a sez.circolare di nylon l'intera struttura o un singolo setto murario. I singoli muri vengono fasciati sia verticalmente che orizzontalmente, facendo passare le estremità del laccio attraverso piccoli fori sulle parti terminali della parete stessa fissando poi insieme le due estremità e quindi mettendo in tensione il cavo. Possono essere sia verticali che orizzontali.

Questo sistema di consolidamento, estremamente semplice ed economico, ha dimostrato la sua efficacia in occasione del terremoto del 1976 in Guatemala (Molino de Garcia 1990).

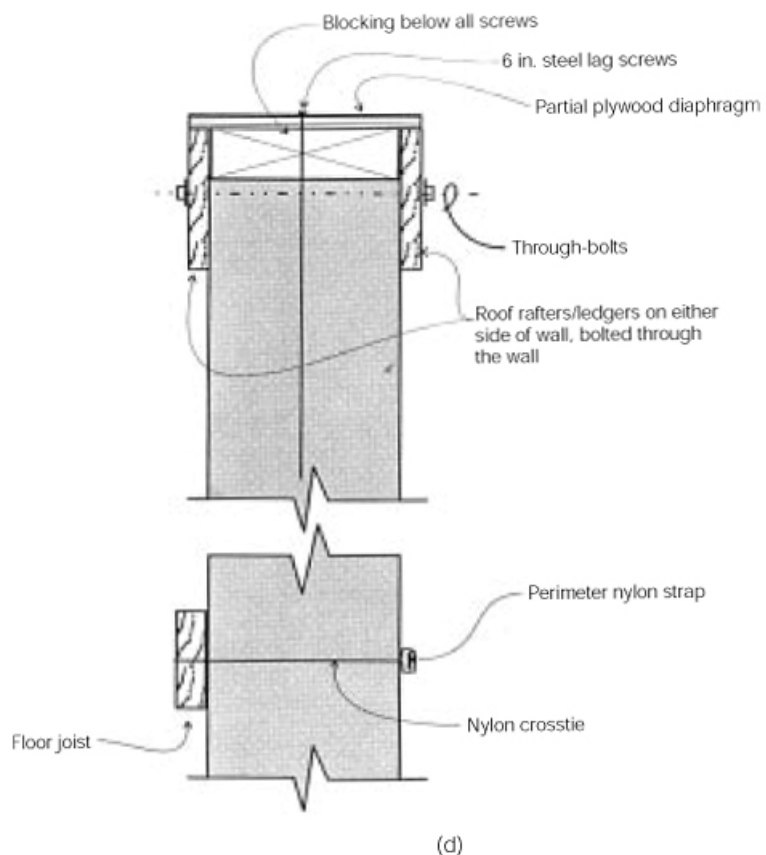
La fascia di nylon viene fissata ai setti murari collegando il suo tratto interno con il suo tratto esterno attraverso giunti sempre di nylon alloggiati in piccoli fori che attraversano la parete (nylon crosstie). Le cerchiature in nylon si sono dimostrate un valido sistema per prevenire l'instabilità, ma nei primi test la pressione trasmessa dai cavi durante il contenimento delle oscillazioni dei setti murari fratturati, ha causato una eccessiva penetrazione del nylon nella muratura agli angoli dei muri e l'allargamento dei fori attraversati dai giunti di collegamento in nylon. Questo ha prodotto una diminuzione di tensione del cavo stesso, che ha di conseguenza consentito un eccessivo movimento relativo dei setti.

Questi problemi sono stati risolti aumentando il numero dei giunti di collegamento lungo il muro, più i collegamenti tra i due lati delle fasce di nylon sono vicini maggiore è l'aderenza della fascia con la parete, e migliore è la distribuzione su tutta la lunghezza del muro delle sollecitazioni prodotte dal contenimento dei movimenti differenziali dei setti lesionati; inoltre si è provveduto a rinforzare con rete elettrosaldata gli angoli dei muri, nella zona in cui passano i cavi di nylon, così da distribuire la pressione su una superficie maggiore.



In figura: - applicazione della rete elettrosaldata negli angoli della struttura in corrispondenza delle fasce di nylon

I migliori risultati sono stati ottenuti realizzando una fasciatura orizzontale dell'intera struttura nella parte inferiore al di sotto della quota di imposta dei vani finestra, fasciando singolarmente ogni muro alla stessa quota; e due fasciature orizzontali nella parte superiore eseguendo una fasciatura orizzontale esterna di tutta la struttura all'altezza del solaio in legno e dell'imposta del tetto, collegando con i giunti in nylon la fascia esterna di nylon alle travi in legno del solaio (floor joist) ed alla trave di bordo all'imposta del tetto. Comparando i risultati dei test condotti presso la Stanford University negli anni 80 sull'efficacia della sola trave di bordo in legno come misura di consolidamento, ai test del GSAP risulta evidente come l'azione combinata della fasciatura orizzontale in Nylon alla trave di bordo in legno migliori le prestazioni della struttura.



In figura: - particolare dell'attacco del tetto
- fasciature di nylon collegate alle travi del solaio

Sono state anche testate legature in nylon parziali di tratti di mura, queste sono state particolarmente efficaci ad esempio per la stabilizzazione dei setti di muro tra i vani.

Le fasciature verticali vengono poste a distanza più o meno regolare a seconda del disegno di facciata, non potendo le fasciature interrompere i vani .

I rinforzi verticali con barre in acciaio o in fibra di vetro, vengono alloggiati in fori realizzati nel centro della muratura e poi riempiti con resina epossidica.

Questo tipo di consolidamento ha dato risultati superiori alle attese. La resina versata nei fori allo stato liquido ha dimostrato di avere ottime capacità di penetrazione nel materiale, grazie alla disomogeneità degli impasti di terra. Dove la densità del materiale è minore, come negli strati di malta, la resina viene assorbita ancora più in profondità, stabilendo un ottimo legame con la muratura. La resina stabilisce un buon legame anche con le travi in legno all'altezza del tetto. L'azione delle barre di rinforzo verticali è stata ottima nel ritardare la comparsa delle prime lesioni. Comparsa le prime lesioni agli angoli dei vani, si sono arrestate per tutta la durata di uno o due test successivi in corrispondenza delle barre di rinforzo, prima di diventare evidenti.

I sistemi di ancoraggio del tetto sono stati perfezionati per migliorare l'aggancio con la muratura, in modo tale che il tetto costituisca per le strutture un contenimento contro le spinte verso l'esterno, e nel contempo si è provveduto a contenere la rigidità della struttura perché questa fosse in grado di assecondare in parte i movimenti delle murature. Possiamo così riassumere:

- sulle pareti portanti ciascuna delle due travi d'appoggio del tetto è stata realizzata in 4 tratti. Anche nei tetti antichi le travi di appoggio erano solitamente discontinue in quanto la discontinuità della trave riduce la sua rigidità.
 - Le travi d'appoggio del tetto sono collegate alle murature attraverso barre metalliche di 8 mm di diametro fissate con resina epossidica.
 - Le travi inclinate del tetto sono inchiodate alle travi d'appoggio ed alla trave di colmo. Il loro fissaggio viene ulteriormente irrigidito da travetti inchiodati alle travi di bordo e di colmo tra una trave inclinata ed un'altra.
 - Sulle pareti non portanti due travi inclinate sono state poste direttamente ai lati della parete, lungo i lati del frontone, e tenute insieme da tiranti (through bolt).
- Per collegare il tetto al frontone sono state inserite barre metalliche di 1.5 cm di diametro con una lunghezza di 40 cm fissate con resina epossidica.

Sugli ultimi due modelli in scala 1:2 sono stati effettuati i test più completi in quanto sono gli unici nei quali si può valutare l'azione del peso proprio della costruzione sulla dinamica delle strutture. Se il peso riduce il rischio di destabilizzazione dei setti per ribaltamento, rende molto più pericolose le lesioni diagonali, in cui agiscono insieme tutte le componenti delle sollecitazioni, in quanto aumenta il rischio di scivolamento lungo le lesioni.

Uno dei due modelli non è stato consolidato, ed è stato realizzato come modello di confronto, l'altro (modello 11) È stato consolidato con:

- cerchiatura in nylon orizzontale esterna dell'intera struttura in corrispondenza delle travi del solaio ed a queste fissate con giunti in nylon

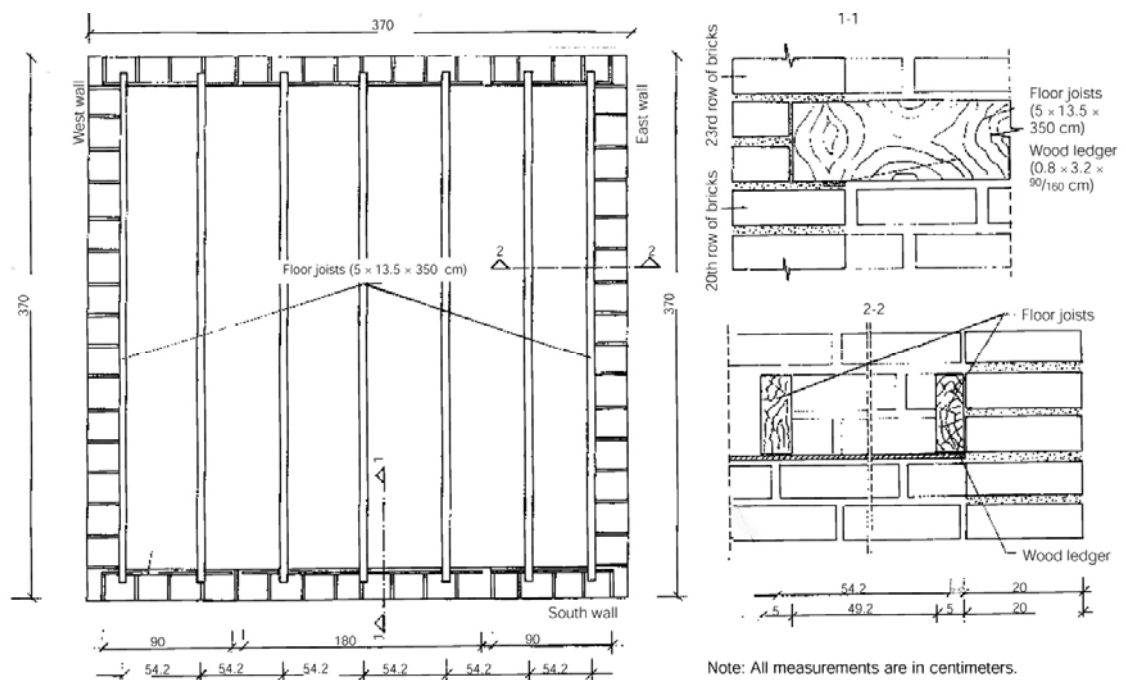
- cerchiatura di nylon interna ed esterna dell'intera struttura al di sotto della quota di imposta dei vani finestra
- 4 barre in acciaio fissate con resina epossidica all'interno della muratura sul lato sud ed ovest del modello
- 4 fasciature in nylon verticali sui lati nord ed est del modello

Il solaio ed il tetto sono stati parzialmente irrigiditi con pannelli in legno, in una struttura reale l'irrigidimento sarebbe costituito dalla pavimentazione e delle coperture del tetto.

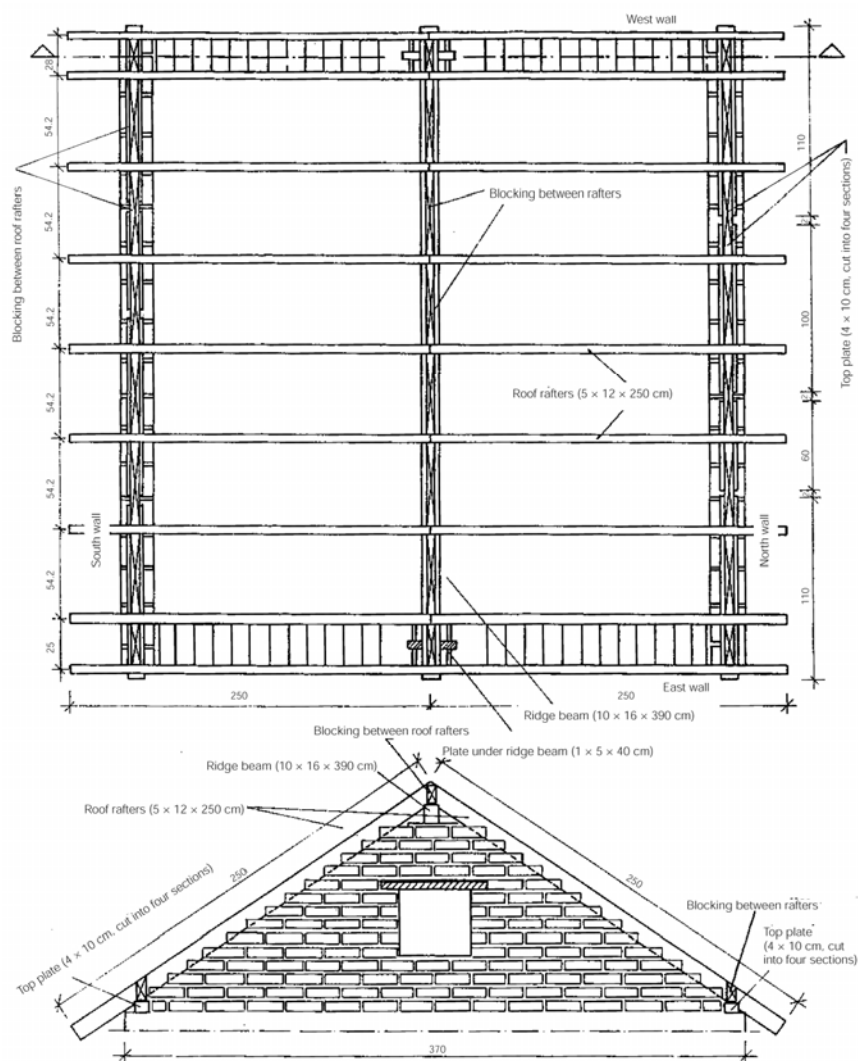
Il rapporto tra altezza a spessore delle murature è 7.5, ovvero una media tra il 5 che è il rapporto altezza larghezza tipico delle strutture più antiche, ed il rapporto pari circa ad 11 di strutture più esili solitamente più recenti.

Sono riportati di seguito i disegni tecnici con le dimensioni e le caratteristiche costruttive del modello 10, non consolidato.

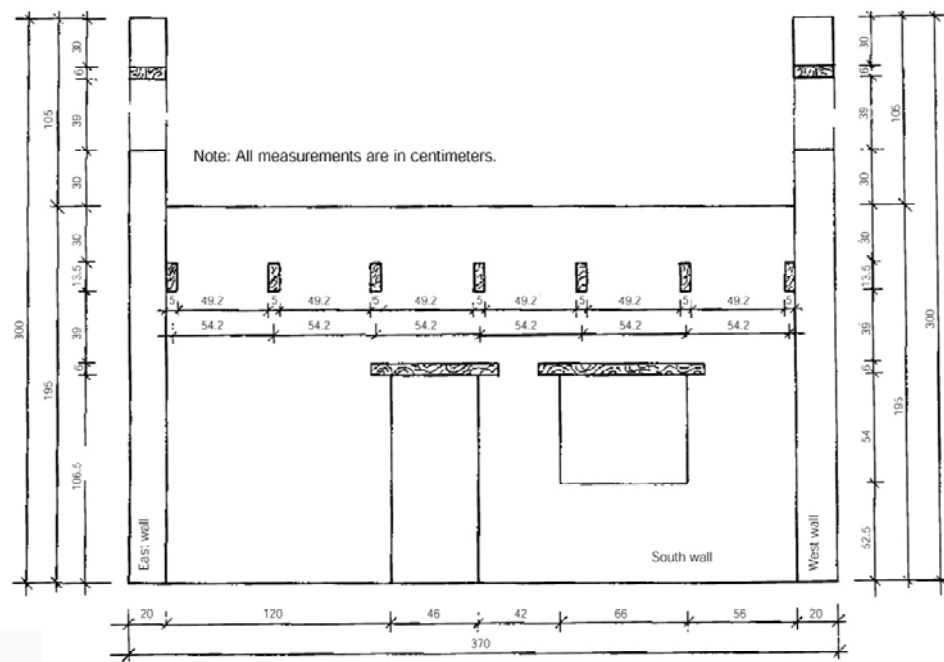
Più avanti sono riportati i dettagli relativi agli interventi di consolidamento testati sul modello 11 (identico al modello 10 ma consolidato)



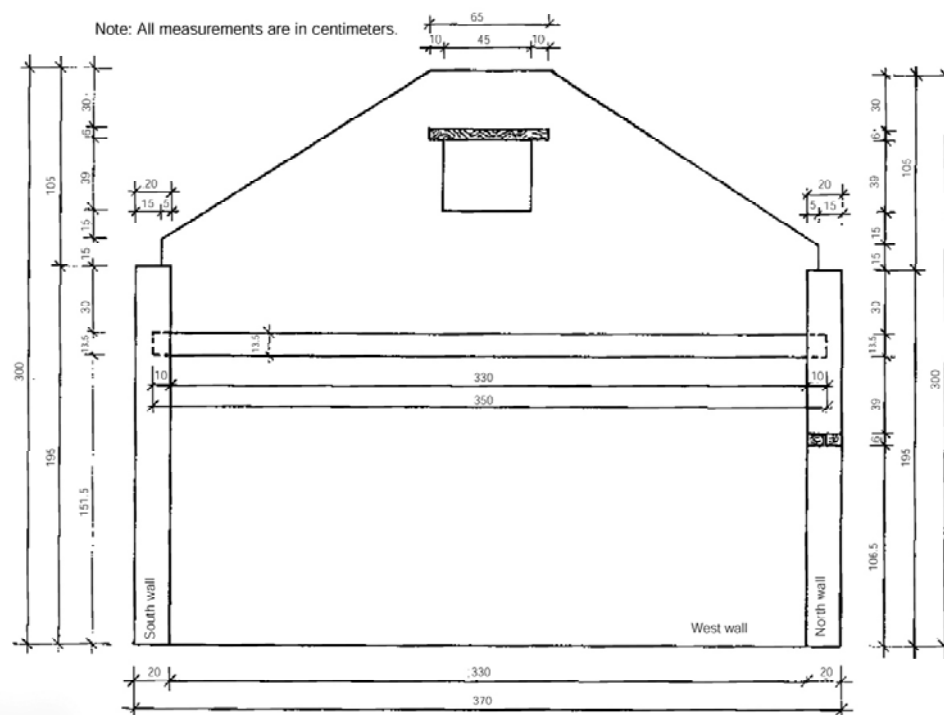
Pianta e particolari costruttivi della struttura del solaio in legno



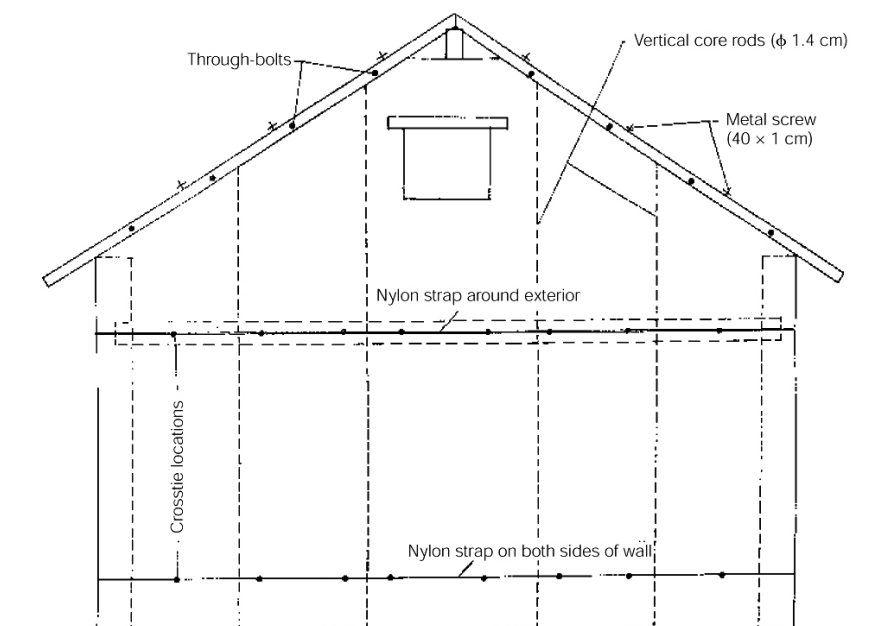
Pianta e particolari costruttivi della struttura del tetto in legno



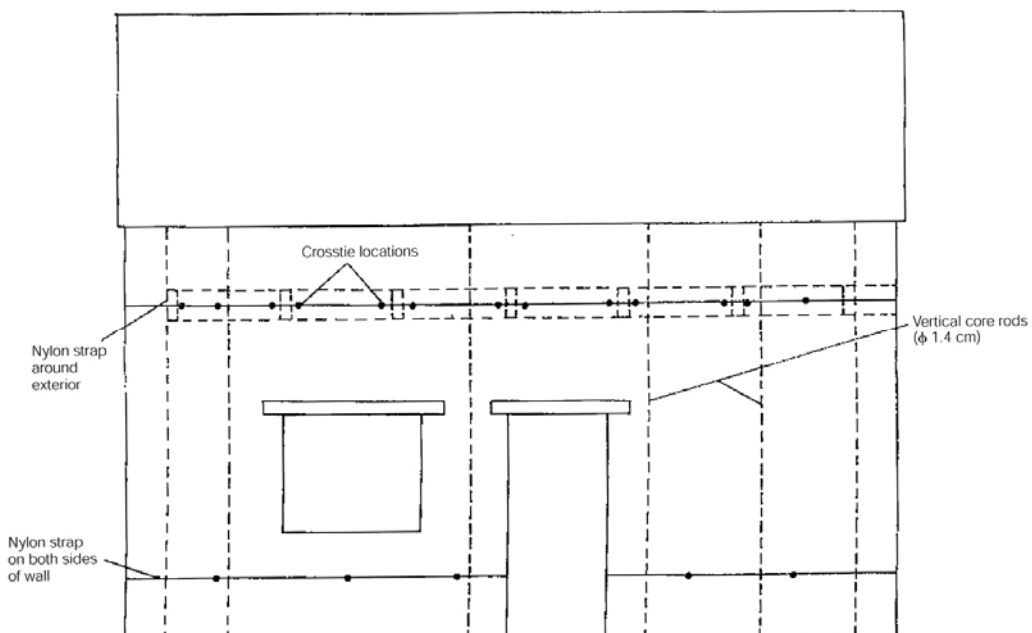
Sezione nord-sud



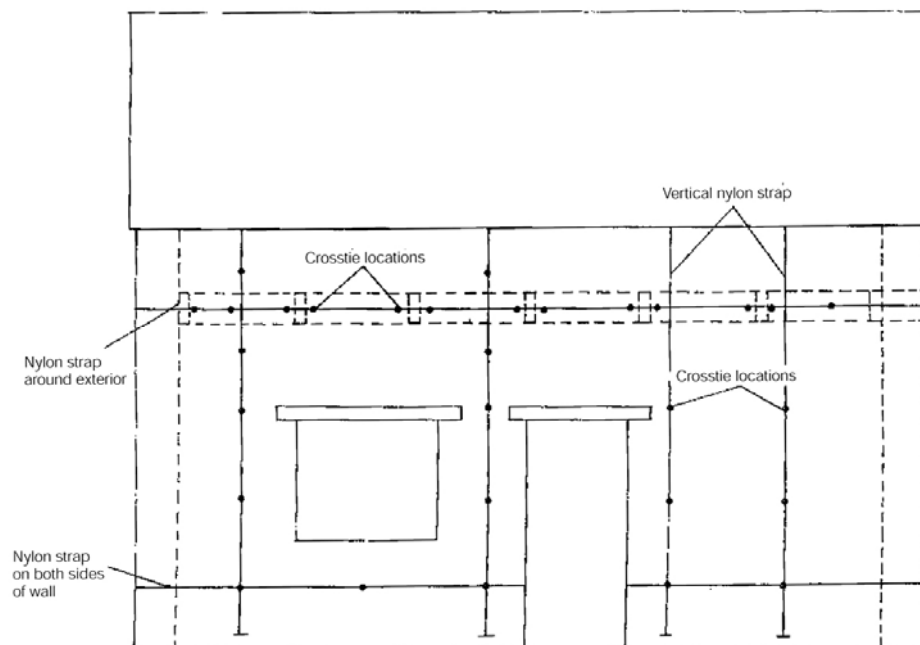
Sezione est-ovest



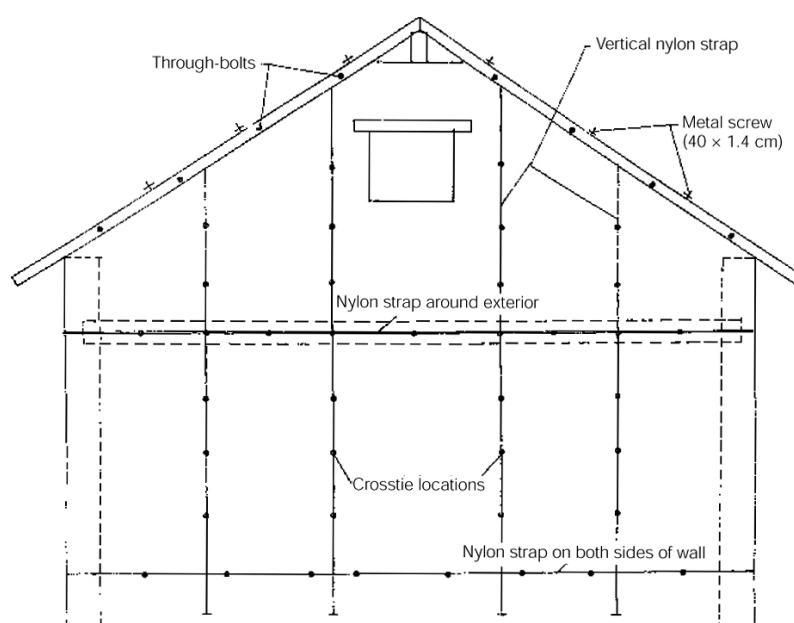
Parete ovest del modello 11 consolidata con barre in acciaio verticali e due fasciature orizzontali in nylon



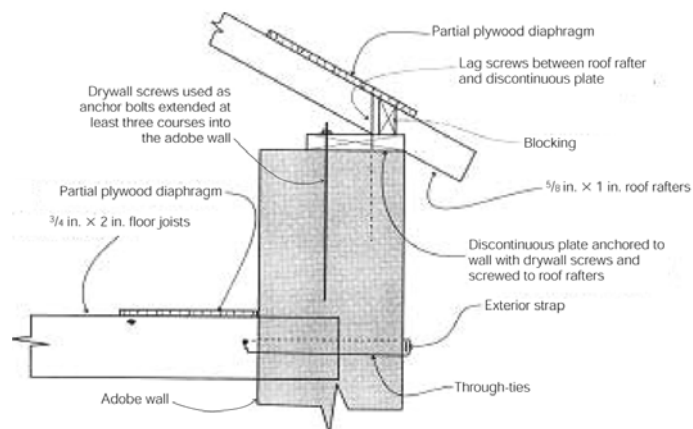
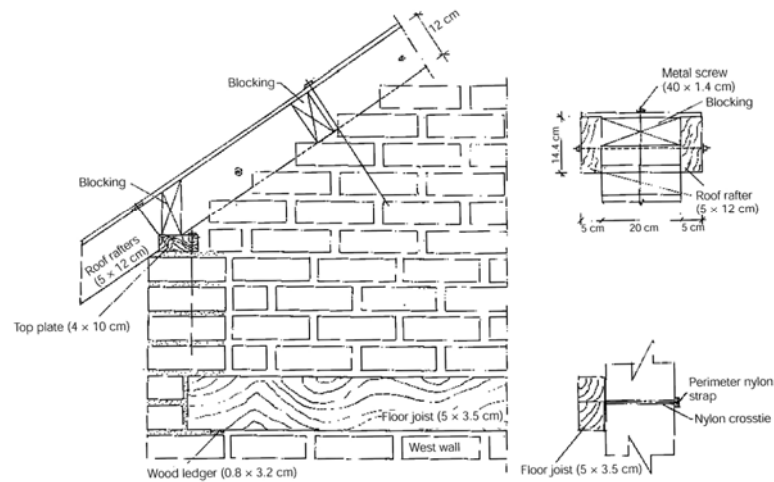
Parete sud del modello 11 consolidata con barre in acciaio verticali e due fasciature orizzontali in nylon



Parete nord del modello 11 consolidata con cerchiature in nylon verticali e due fasciature orizzontali in nylon

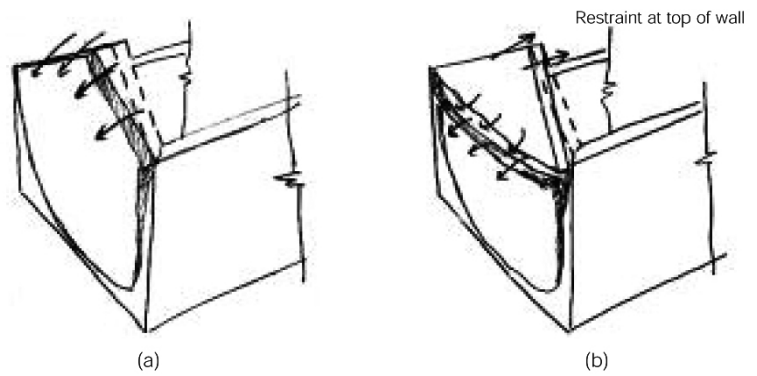


Parete est del modello 11 consolidata cerchiature in nylon verticali e due fasciature orizzontali in nylon



Particolari costruttivi della struttura del tetto in legno

Il primo modello, non consolidato ha reagito in modo elastico alle sollecitazioni fino al III test. Le lesioni si sono rese evidenti tra il III test ed il VI, ma la struttura è rimasta stabile fino al VI livello del test, quando le lesioni si sono allungate a tutta la struttura rendendo instabile il modello. Durante il VII livello si sono formate lesioni trasversali, e durante i primi secondi dell'VII test la struttura ha ceduto (foto.n.__)

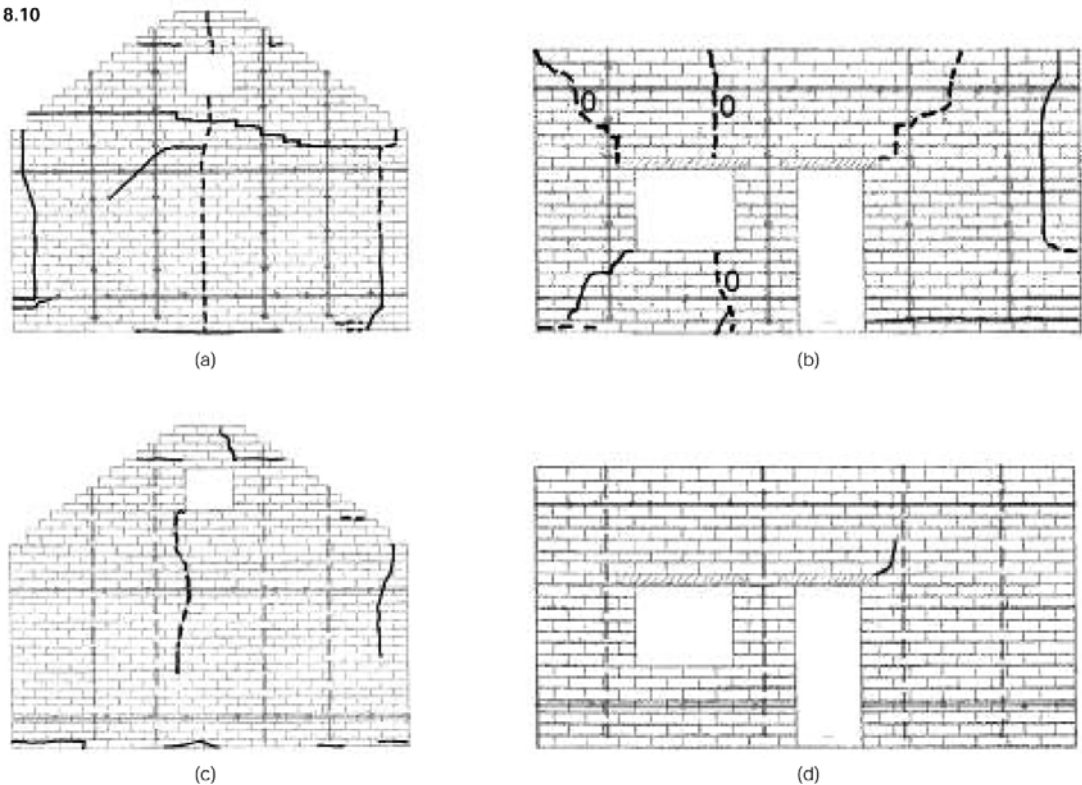


Il collasso del modello X giunto al VIII grado dei test



Nel secondo modello le lesioni sono diventate evidenti tra il V ed il VI livello di sollecitazione, ma solo sui lati nord ed est, dove le fasciature di nylon non avendo abbastanza rigidità, non hanno fermato la formazione delle lesioni, a differenza delle barre in acciaio sui lati sud ed ovest, che hanno bloccato la formazione di lesioni fino al livello VII, l'assenza di barre orizzontali, ha però permesso il formarsi di alcune lesioni verticali (vedi fig.)

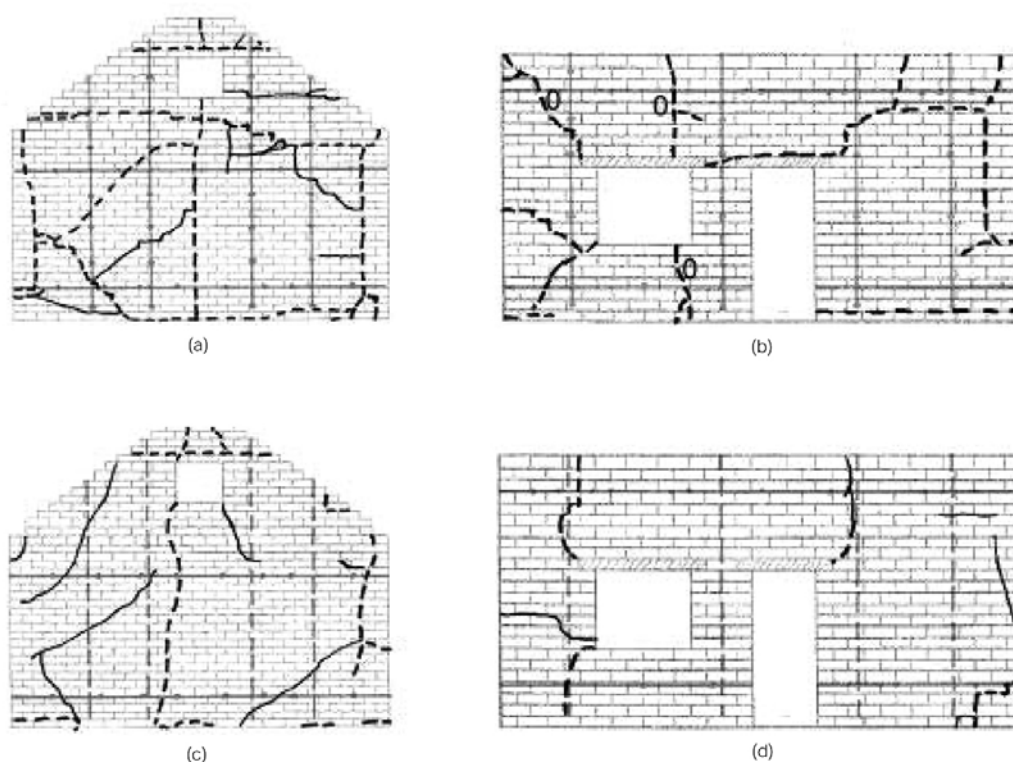
Figure 8.10



Quadro fessurativo successivo al V livello dei test sul modello XI:
schema **A** facciata est; schema **B** facciata nord;
schema **C** facciata ovest; schema **D** facciata sud

Dal VI al VIII livello entrano in funzione tutte le misure di consolidamento predisposte sulla struttura, per impedire la perdita di stabilità. Risulta però molto evidente la migliore tenuta delle barre in acciaio rispetto alle cerchiature in nylon soprattutto all' VIII livello dei test, quando sulla facciata est compaiono quasi cenni di cedimento. Entrambe le misure di consolidamento riescono comunque a prevenire il crollo della struttura, soddisfacendo il primo criterio di sicurezza (Tolles e Ginell 2000).

Figure 8.12



Quadro fessurativo successivo al VII livello dei test sul modello XI:
schema **A** facciata est; schema **B** facciata nord;
schema **C** facciata ovest; schema **D** facciata sud

In definitiva possiamo dire che le fasciature in nylon per quanto siano in grado di prevenire l'instabilità delle strutture, non sono utili nel ritardare la formazione delle lesioni, inoltre il loro uso può ritenersi inopportuno quanto esistono superfici da preservare, come nel caso di pareti affrescate, nel qual caso non sarebbe possibile coprire le fasciature con intonaci, mentre l'applicazione di barre verticali in acciaio e resina in un caso del genere sarebbe sicuramente efficace. Il limite del consolidamento con le barre in acciaio è nella non reversibilità della procedura. E' quindi necessario definire di volta in volta le tecniche di intervento più opportune, come in tutti gli interventi di restauro.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Foto del modello XI al livello dei test VII:
schema A facciata est; schema B facciata nord;
schema C facciata ovest; schema D facciata sud



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Foto del modello XI al livello dei test VIII:
schema A facciata est; schema B facciata nord;
schema C facciata ovest; schema D facciata sud

Le conclusioni del Getty Seismic Conservation Project

Il Getty Seismic Conservation Project iniziò nel 1991 con l'obiettivo di sviluppare procedure tecniche per migliorare il comportamento sismico delle antiche strutture in adobe nel rispetto delle istanze di conservazione dei monumenti storici.

Per quanto tale problematica fosse già stata affrontata in precedenza, e fossero già state indicate diverse procedure di intervento non invasive, mancava una adeguata sperimentazione che comprovasse l'effettiva efficacia delle stesse.

Il GSAP attraverso i risultati di una serie test dinamici per la simulazione sismica, condotti su modelli di costruzioni in adobe in scala 1:5 e 1:2, ha dimostrato la validità delle procedure proposte e fornito la necessaria informazione tecnico scientifica per giustificare l'uso di tecniche non invasive.

I principali risultati del GSAP si possono così riassumere:

- definire i requisiti attesi da un corretto intervento di consolidamento sulle antiche strutture in adobe
- mettere a punto una serie di procedure tecniche efficaci per migliorare la resistenza sismica delle strutture, assicurando l'incolumità delle persone al suo interno e minimizzando i danni alle strutture
- testare l'efficacia delle procedure individuate per verificarne la validità
- presentazione di rapporti periodici sulle attività del GSAP e la pubblicazione degli studi per una efficiente divulgazione dei risultati
- fornire indicazioni utili alla progettazione di interventi di consolidamento sugli edifici in adobe (Planning and engeneering guidelines for the seismic retrofit of historic adobe structures – Tolles Timbro and Ginell, 2002)

- Fornire una accurata documentazione scientifica sugli effetti del terremoto di Northridge del 12 gennaio 1994 sugli edifici in adobe (Survey of Damage to Historic Adobe Buildings after the January 1994 Northridge Earthquake – Tolles et al. 1996)

Osservazioni sugli effetti del terremoto di Northridge del 12 gennaio 1994 sugli edifici in adobe

Dalle osservazioni sui danni prodotti dal terremoto di Northridge del 1994, sono state messe in rilievo le osservazioni riportate di seguito.

I danni prodotti dalle infiltrazioni di umidità nei muri, come i ricorrenti danni prodotti dall'umidità di risalita, possono compromettere significativamente la capacità di resistenza delle murature nelle parti deteriorate, soprattutto se su queste patologie vengono effettuati interventi di risanamento con materiali non adatti, come il rivestimento con lastre di cemento, che comportano un grosso aggravamento dei processi di deterioramento delle murature, anche maggiore di quelli provocati dalle sole infiltrazioni. Questo sottolinea l'importanza di una corretta manutenzione per la preservazione delle strutture in terra. Nasce però anche un'altra osservazione, relativa ai sistemi di consolidamento analizzati dal GSAP. Durante i test sul consolidamento con le barre in acciaio e resina epossidica, le barre in acciaio sono state introdotte solo nel muro in adobe, senza continuare all'interno delle fondazioni in cemento dei modelli, in questo modo le sezioni di contatto tra la muratura e la sua fondazione in cemento, punti di contatto tra materiali diversi e con un diverso comportamento elastico, non viene consolidata. Questo può diventare un problema se associato ad un degrado del materiale prodotto da infiltrazioni o altro. Se nei modelli sono state evidenziate alla base dei muri solo lievi lesioni orizzontali di rilevanza trascurabile, l'azione combinata delle sollecitazioni sismiche su sezioni danneggiate dall'umidità alla base dei muri potrebbe compromettere la stabilità dei setti, fino a determinare il ribaltamento .

L'introduzione delle barre in acciaio fissate con la resina all'interno delle strutture di fondazione, ridurrebbe la vulnerabilità delle basi delle murature. Si aumenterebbe però la rigidità della struttura, e potrebbe derivarne un aumento delle sollecitazioni alla base del tetto. Ulteriori test potrebbero dare risposte definitive a queste problematiche.

Un altro elemento evidenziato in seguito al terremoto di Northridge, è l'importanza di operare consolidamenti valutando il comportamento complessivo della struttura e non solo di una parte di questa. Gli interventi parziali possono rivelarsi più nocivi che di aiuto.

Si è inoltre resa evidente l'importanza della qualità della terra usata per le strutture per garantire un buon comportamento statico delle stesse.